Biblioteca
de Divulgación Científica



ISAAC ASIMOV
INTRODUCCIÓN
A LA CIENCIA
(Vol. II)

EDICIONES ORBIS, S. A.
Distribución exclusiva para Argentina, Chile, Paraguay, Perú y Uruguay



HYSPAMERICA
Título original: *Asimov's guide to science*
Traducción: Jorge de Orus y Manuel Vázquez
Asesor científico: Pedro Puigdoménech Rosell
Dirección de la colección: Virgilio Ortega

Distribución exclusiva para Argentina, Chile, Paraguay, Perú y Uruguay:
HYSPAMERICA EDICIONES ARGENTINA, S. A.
Corrientes, 1437, 4.º piso. (1042) Buenos Aires
Tels. 46-4385/4484/4419
ISBN: 84-7634-116-4 (Obra Completa)
ISBN: 84-7634-118-0 (Volumen 11)
Depósito legal: M. 10295-1986
Impreso en Artes Gráficas EMA. Miguel Yuste, 27.
28037 Madrid
Encuadernado por LARMOR
Printed in Spain
Scan/OCR/Corrección/Edición: Xixoxux

ISAAC ASIMOV

INTRODUCCIÓN A LA CIENCIA

SEGUNDA PARTE: CIENCIAS BIOLÓGICAS*

X. LA MOLÉCULA

Materia Orgánica

El término molécula (de la palabra latina que significa «masa pequeña») originalmente se aplicó a la última unidad indivisible de una sustancia. Y, en cierto sentido, es una partícula simple, debido a que no puede desintegrarse sin perder su identidad. En efecto, una molécula de azúcar o de agua puede dividirse en átomos o grupos simples, pero en este caso deja de ser azúcar o agua. Incluso una molécula de hidrógeno pierde sus características propiedades químicas cuando se escinde en sus dos átomos de hidrógeno constituyentes.

---

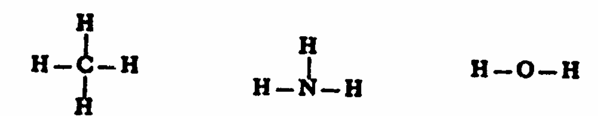
* Edición en inglés en un solo volumen. Edición en castellano, 2 Volúmenes: Primera Parte: Ciencias Físicas; Segunda Parte: Ciencias Biológicas. (N. de Xixoxux)

Del mismo modo como el átomo ha sido motivo de gran excitación en la Física del siglo xx, así la molécula fue el sujeto de descubrimientos igualmente excitantes en la Química. Los químicos han sido capaces de desarrollar imágenes detalladas de la estructura de moléculas incluso muy complejas, de identificar el papel desempeñado por moléculas específicas en los sistemas vivos, de crear elaboradas moléculas nuevas, y de predecir el comportamiento de la molécula de una estructura dada con sorprendente exactitud.
Hacia mediados de este siglo, las complejas moléculas que forman las unidades clave de los tejidos vivos, las proteínas o los ácidos nucleicos, fueron estudiadas con todas las técnicas puestas a disposición por una Química y una Física avanzadas. Las dos Ciencias, «Bioquímica» (el estudio de las reacciones químicas que tienen lugar en el tejido vivo) y «Biofísica» (el estudio de las fuerzas y fenómenos físicos implicados en los procesos vivos), confluyeron para formar una nueva disciplina: la «Biología molecular». A través de los hallazgos de la Biología molecular, la Ciencia moderna ha logrado, en una sola generación de esfuerzos, todo salvo definir exactamente dónde se halla la frontera entre lo vivo y lo inanimado.
Pero, hace menos de un siglo y medio, no se comprendía siquiera la estructura de la molécula más sencilla.
Casi todo lo que los químicos de comienzos del siglo XIX podían hacer era dividir la materia en dos grandes categorías. Desde hacía tiempo se habían percatado (incluso en los días de los alquimistas) de que las sustancias pertenecían a dos clases claramente distintas, por lo que se refería a su respuesta al calor. Un grupo —por ejemplo, sal, plomo, agua— permanecía básicamente inalterado después de ser calentado. La sal podía volverse incandescente cuando se calentaba, el plomo se fundía, el agua se evaporaba —pero al enfriarse de nuevo a la temperatura de partida volvían a adquirir su forma original, nada peor, aparentemente, para su experiencia—. Por otra parte, el segundo grupo de sustancias —por ejemplo, el azúcar, el aceite de oliva— cambiaban de forma permanente, por la acción del calor. El azúcar se acaramelaba al calentarse y permanecía carbonizado después de enfriarse; el aceite de oliva se evaporaba y este vapor no se condensaba al enfriarse. Eventualmente, los científicos notaron que las sustancias resistentes al calor procedían por lo general del mundo inanimado del aire, océano, y suelo, mientras que las sustancias combustibles procedían del mundo vivo, bien directamente de la materia viva o de sus restos muertos. En 1807, el químico sueco Jöns Jakob Berzelius denominó «orgánicas» a las sustancias combustibles (debido a que derivaban, directa o indirectamente, de los organismos vivos) y a todas las demás «inorgánicas».
Inicialmente, la Química centró su atención sobre las sustancias inorgánicas. El estudio del comportamiento de los, gases inorgánicos condujo al desarrollo de la teoría atómica. Una vez se estableció tal teoría, se aclaró pronto la naturaleza de las moléculas inorgánicas. El análisis mostró que las moléculas inorgánicas consistían, por lo general, en un pequeño número de átomos diferentes en proporciones definidas. La molécula de agua contenía dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno; la molécula de sal contenía un átomo de sodio y uno de cloro; el ácido sulfúrico contenía dos átomos de hidrógeno, uno de azufre. Y cuatro de oxígeno, etc.
Cuando los químicos comenzaron a analizar las sustancias orgánicas, el cuadro que se les ofreció parecía ser totalmente distinto. Las sustancias podían tener exactamente la misma composición y, no obstante, mostrar propiedades muy distintas. (Por ejemplo, el alcohol etílico está compuesto de 2 átomos de carbono, 1 átomo de oxígeno y 6 átomos de hidrógeno; también está compuesto así el éter dimetílico. No obstante, uno es un líquido a la temperatura ambiente, mientras que el otro es un gas.) Las moléculas orgánicas contenían muchos más átomos que las inorgánicas simples, y parecían combinadas sin demasiada lógica. Simplemente, los compuestos orgánicos no podían explicarse por las sencillas leyes de la Química, a las que tan maravillosamente se adaptaban las sustancias inorgánicas. Berzelius decidió que la química de la vida era algo distinto, algo que obedecía a su propia serie de sutiles reglas. Sólo el tejido vivo —afirmó—. Podría crear

un compuesto orgánico. Su punto de vista es un ejemplo del «vitalismo».
¡Luego, en 1828, el químico alemán Friedrich Wöhler, un discípulo de Berzelius, produjo una sustancia orgánica en el laboratorio! La obtuvo al calentar un compuesto denominado cianato amónico, que era considerado en general como inorgánico. Wöhler se quedó estupefacto al descubrir que, al ser calentado, ese material se convertía en una sustancia blanca idéntica en sus propiedades a la «urea», un compuesto de la orina. Según las teorías de Berzelius, sólo el riñón vivo podía formar la urea, y Wöhler la acababa de producir a partir de una sustancia inorgánica, simplemente al aplicarle algo de calor. Wöhler repitió la experiencia muchas veces, antes de atreverse a publicar su descubrimiento. Cuando finalmente lo hizo, Berzelius y otros, al principio, rehusaron creerlo. Pero otros químicos confirmaron los resultados. Además de eso, lograron sintetizar muchos otros compuestos orgánicos a partir de precursores inorgánicos. El primero en lograr la producción de un compuesto orgánico a partir de sus elementos fue el químico alemán Adolf Wilhelm Hermann Kolbe, quien, en 1845, produjo ácido acético de esta forma. Fue realmente esto lo que puso punto final a la versión vitalista de Berzelius. Cada vez se hizo más y más evidente que las mismas leyes químicas se aplicaban por igual a las moléculas inorgánicas.
Eventualmente, se ofreció una sencilla definición para distinguir entre las sustancias orgánicas y las inorgánicas: todas las sustancias que contenían carbono (con la posible excepción de unos pocos compuestos sencillos, tales como el dióxido de carbono) se denominaron orgánicas; las restantes eran inorgánicas.
Para poder enfrentarse con éxito a la compleja Química nueva, los químicos precisaban un simple método de abreviatura para representar los compuestos, y, afortunadamente, ya Berzelius había sugerido un sistema de símbolos conveniente y racional. Los elementos fueron designados mediante las abreviaturas de sus nombres latinos. Así C sería el símbolo para el carbono, O para el oxígeno, H para el hidrógeno, N para el nitrógeno, S para el azufre, P para el fósforo, etc... Cuando dos elementos comenzaban con la misma letra, se utilizaba una segunda letra para distinguirlos entre sí: por ejemplo, Ca para el Calcio, Cl para el cloro, Cd para el cadmio, Co para cobalto, Cr para el cromo, etc. Sólo en unos pocos casos, los nombres latinos o latinizados (y las iniciales) son distintos de las españolas, así: el hierro *(ferrum)* tiene el Fe; la plata *(argentum),* el Ag; el oro *(aurum),* el Au; el cobre *(cuprum),* el Cu; el estaño *(stannum),* el Sn; el mercurio *(hydragyrum),* el Hg; el antimonio *(stibium),* el Sb; el sodio *(natrium),* el Na; y el potasio *(kalium),* el K. Con este sistema es fácil simbolizar la composición de una molécula. El agua se escribe H_2O (indicando así que la molécula consiste de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno); la sal, NaCl; el ácido sulfúrico, H_2SO_4, etc. A ésta se la denomina la «fórmula empírica» de un compuesto; indica de qué está formado el compuesto pero no dice nada acerca de su estructura, es decir, la forma en que los átomos de la molécula se hallan unidos entre sí.
El barón Justus von Liebig, un colaborador de Wöhler, se dedicó al estudio de la composición de una serie de sustancias orgánicas, aplicando el «análisis químico» al campo de la Química orgánica. Calentaba una pequeña cantidad de una sustancia orgánica y retenía los gases formados (principalmente CO_2 y vapor de agua, H_2O) con sustancias químicas apropiadas. Luego pesaba las sustancias químicas utilizadas para captar los productos de combustión, al objeto de ver cómo había aumentado su peso a causa de los productos captados. A partir del peso podía determinar la cantidad de carbono, hidrógeno y oxígeno existentes en la sustancia original. Luego era fácil calcular, a partir de los pesos atómicos, el número de cada tipo de átomo en la molécula. De esta forma, por ejemplo, estableció que la molécula del alcohol etílico tenía la fórmula C_2H_6O.
El método de Liebig no podía medir el nitrógeno presente en los compuestos orgánicos, pero el químico francés Jean-Baptiste-André Dumas ideó un método de combustión que recogía el nitrógeno gaseoso liberado a partir de las sustancias. Hizo uso de este método para analizar los gases de la atmósfera, con una exactitud sin precedentes, en 1841.

Los métodos del «análisis orgánico» se hicieron cada vez más y más precisos hasta alcanzar verdaderos prodigios de exactitud con los «métodos microanalíticos» del químico austríaco Fritz Pregl. Éste ideó técnicas, a principios de 1900, para el análisis exacto de cantidades de compuestos orgánicos que apenas se podían distinguir a simple vista, y, a consecuencia de ello, recibió el premio Nobel de Química en 1923.
Desgraciadamente, la simple determinación de las fórmulas empíricas de los compuestos orgánicos no permitía dilucidar fácilmente su química. Al contrario que los compuestos inorgánicos, que usualmente consistían de 2 ó 3, o, a lo sumo, de una docena de átomos, las moléculas orgánicas eran con frecuencia enormes. Liebig halló que la fórmula de la morfina era $C_{17}H_{19}O_3N$ y la de la estricnina $C_{21}H_{22}O_2N_2$.
Los químicos apenas sabían qué hacer con moléculas tan grandes, ni cómo iniciar o acabar sus fórmulas. Wöhler y Liebig intentaron agrupar los átomos en agregados más pequeños denominados «radicales», al tiempo que elaboraron teorías para demostrar que diversos compuestos estaban formados por radicales específicos en cantidades y combinaciones diferentes. Algunos de los sistemas fueron sumamente ingeniosos, pero en realidad ninguno aportaba suficiente explicación. Fue particularmente difícil explicar por qué compuestos con la misma fórmula empírica, tales como el alcohol etílico y el dimetil éter, poseían diferentes propiedades.
Este fenómeno fue dilucidado por vez primera hacia 1820 por Liebig y Wöhler. El primero estudiaba un grupo de compuestos llamados «fulminatos», mientras que Wöhler examinaba un grupo denominado «isocianatos»; ambos grupos resultaron tener las mismas fórmulas empíricas: por así decirlo, los elementos se hallaban presentes en proporciones iguales. Berzelius, el dictador químico en aquella época, fue informado de esta particularidad, pero rechazó aceptar tal creencia hasta que, en 1830, él mismo descubrió algunos ejemplos. Denominó a tales compuestos, de diferentes propiedades pero con elementos presentes en las mismas proporciones, «isómeros» (a partir de las palabras griegas que significan «partes iguales»). La estructura de las moléculas orgánicas era realmente un verdadero rompecabezas en aquellos días.
Los químicos, perdidos en esta jungla de la Química orgánica, comenzaron a ver un rayo de luz, en 1850, al descubrir que un determinado átomo se podía combinar solamente con un cierto número de otros átomos. Por ejemplo, el átomo de hidrógeno aparentemente se podía unir sólo a un único átomo de otro elemento: formaría ácido clorhídrico, HCl, pero nunca HCl_2. De manera similar, el cloro y el sodio solamente podrían unirse a otro átomo, formando en este caso el NaCl. Por otra parte, un átomo de oxígeno podría unirse a dos átomos de otro elemento: por ejemplo, H_2O. El nitrógeno podría unirse a tres: por ejemplo, NH_3 (amoníaco). Y el carbono podía combinarse hasta con cuatro: por ejemplo, Cl_4C (tetracloruro de carbono).
En resumen, parecía como si cada tipo de átomo tuviera un cierto número de ganchos mediante los cuales pudiera unirse a otros átomos. El químico inglés Edward Frankland denominó a estos ganchos enlaces de «valencia», a partir de una palabra latina que significa «poder», para significar los poderes de combinación de los elementos.
El químico alemán Friedrich August Kekulé von Stradonitz, verificó que, si se asignaba al carbono una valencia de 4 y si se suponía que los átomos de carbono podían utilizar aquellas valencias, al menos en parte, para unirse en cadenas, en este caso podría dibujarse un mapa a través de aquella jungla orgánica. Su técnica fue perfeccionada haciéndola más visual gracias a la sugerencia de un químico escocés, Archibald Scott Couper, según la que estas fuerzas de combinación de los átomos («enlaces», tal como generalmente se las denomina) se representan en la forma de pequeños guiones. De esta manera, las moléculas orgánicas podrían edificarse al igual que muchos juegos de estructuras «engarzables».
En 1861, Kekulé publicó un texto con muchos ejemplos de este sistema, que demostró su conveniencia y valor. La «fórmula estructural» se convirtió en el sello del químico orgánico.

Por ejemplo, las moléculas del metano (CH_4), el amoníaco (NH_3), y el agua (H_2O), respectivamente, podían ser representadas de esta forma:



Las moléculas orgánicas podían representarse como cadenas de átomos de carbono con átomos de hidrógeno unidos a los lados. Así el butano (C_4H_{10}) tendría la estructura:

El oxígeno o el nitrógeno podían entrar a formar parte de la cadena de la siguiente manera, representando a los compuestos alcohol metílico (CH_4O) y metilamina (CH_5N) respectivamente, de la forma siguiente:

Un átomo que poseyera más de un gancho, tal como el carbono, con cuatro de ellos, no precisaba utilizar cada uno para un átomo distinto: podía formar un enlace doble o triple con uno de sus vecinos, como en el etileno (C_2H_4) o el acetileno (C_2H_2):

Entonces podía apreciarse fácilmente cómo dos moléculas podían tener el mismo número de átomos de cada elemento y, no obstante, diferir en sus propiedades. Los dos isómeros debían diferir en la disposición de los átomos. Por ejemplo, las fórmulas estructurales del alcohol etílico y el dimetil éter, respectivamente, podían escribirse:

Cuanto mayor es el número de átomos en una molécula, tanto mayor es el número de disposiciones posibles y por tanto el número de isómeros. Por ejemplo, el heptano, una molécula constituida por 7 átomos de carbono y 15 átomos de hidrógeno, puede ser dispuesta en nueve formas distintas; en otras palabras, pueden existir nueve diferentes heptanos, cada uno con sus particulares propiedades. Estos nueve isómeros se asemejan considerablemente entre sí, pero es sólo una semejanza aparente. Los químicos han preparado la totalidad de estos nueve isómeros, pero nunca han conseguido hallar un décimo isómero, lo que constituye una buena demostración en favor del sistema de Kekulé.
Un compuesto que contenga 40 átomos de carbono y 82 átomos de hidrógeno podrá mostrar 62.5 billones de disposiciones distintas o isómeros. Y una molécula orgánica de este tamaño no es en modo alguno infrecuente.
Sólo los átomos de carbono pueden unirse entre sí para formar largas cadenas. Otros átomos pueden formar una cadena a lo sumo de una docena y media de unidades. Este es el motivo por el cual

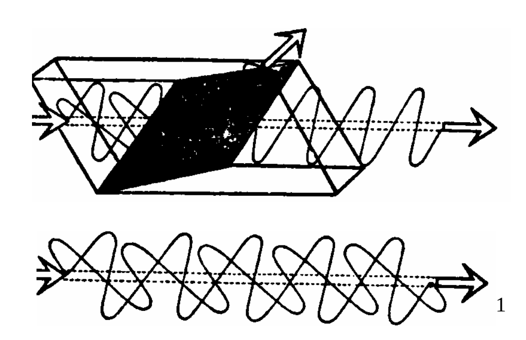
las moléculas inorgánicas son en general sencillas, y por qué raras veces tienen isómeros. La mayor complejidad de la molécula orgánica introduce tantas posibilidades de isomería, que casi se conocen dos millones de compuestos orgánicos, formándose diariamente otros nuevos, mientras que se espera descubrir un número virtualmente ilimitado de ellos.

En la actualidad, las fórmulas estructurales son utilizadas universalmente como guías visuales indispensables de la naturaleza de las moléculas orgánicas. Como abreviatura, a menudo los químicos escriben la fórmula de la molécula en términos de los grupos de átomos («radicales») que la constituyen, tales como los radicales metilo (CH_3) y metileno (CH_2). Así la fórmula del butano puede escribirse como $CH_3CH_2CH_2CH_3$.

Los Detalles De La Estructura

En la segunda mitad del siglo XIX, los químicos descubrieron un tipo de isomerismo particularmente sutil que demostró tener una gran importancia en la química de los seres vivos. El descubrimiento surgió del singular efecto asimétrico que ciertos compuestos orgánicos tenían sobre los rayos de luz que pasaban a su través.

Una sección transversal de un rayo de luz ordinaria mostraría que las ondas de las que consiste vibran en todos los planos: hacia arriba y abajo, de lado a lado, y oblicuamente. A esta luz se la denomina «no polarizada». Pero cuando la luz pasa a través de un cristal de la sustancia transparente llamada espato de Islandia, por ejemplo, es refractada de tal forma que la luz emerge «polarizada». Es como si la disposición de los átomos en el cristal permitiera que pasaran a su través sólo ciertos planos de vibración (del mismo modo como los barrotes de una valla pueden permitir el paso a su través de una persona que se deslice entre ellos de lado, mientras no dejarán pasar a una que intente hacerlo de frente). Existen dispositivos, tales como el «prisma de Nicol», inventado por el físico escocés William Nicol en 1829, que permite el paso de la luz en sólo un plano. Ahora ha sido remplazado éste, para la mayoría de sus usos, por materiales tales como el Polaroid (cristales de un complejo de sulfato de quinina y yodo, alineados con los ejes paralelos y embebidos en nitrocelulosa), producido por vez primera hacia 1930 por Edwin Land.


[1]

La luz reflejada, a menudo está parcialmente polarizada en un plano, tal como fue descubierto por vez primera en 1808 por el físico francés Étienne-Louis Malus. (Él inventó el término «polarización», al aplicar la observación de Newton acerca de los polos de las partículas de luz, una ocasión en la que Newton se equivocó, aunque de todas formas el nombre persistió.) El resplandor de la luz reflejada por las ventanas de los edificios y automóviles, y aún de las autopistas pavimentadas, puede, por tanto, ser reducido hasta niveles tolerables mediante el empleo de gafas de sol con cristales «Polaroid».

A principios del siglo XIX, el físico francés Jean-Baptiste Biot había descubierto que, cuando la luz polarizada en un plano pasaba a través de cristales de cuarzo, el plano de polarización giraba. Es decir, la luz que penetraba vibrando en un plano

[1] La polarización de la luz. Las ondas de luz vibran normalmente en todos los planos (arriba). El prisma de Nicol (abajo) permite que las vibraciones se produzcan sólo en un plano, reflejando las otras. La luz transmitida se halla polarizada en un plano.

emergía vibrando en un plano distinto. A una sustancia que muestra ese efecto se dice que es «ópticamente activa». Algunos cristales de cuarzo giraban el plano en el sentido de las agujas del reloj («rotación dextrógira») y algunos en sentido contrario al del giro de las agujas del reloj («rotación levógira»).

Biot halló que ciertos compuestos orgánicos, tales como el alcanfor y el ácido tartárico, hacían lo mismo. Pensó, asimismo, que algún tipo de asimetría en la disposición de los átomos en las moléculas era responsable de la rotación experimentada por la luz. Pero, durante varios decenios, esta sugerencia siguió siendo una simple especulación.

En 1844, Louis Pasteur (que entonces tenía sólo veintidós años de edad) estudió esta interesante cuestión.

Investigó dos sustancias: el ácido tartárico y el «ácido racémico». Ambos tenían la misma composición química, pero el ácido tartárico giraba al plano de la luz polarizada, mientras que el racémico no lo hacía. Pasteur sospechó que los cristales de las sales del ácido tartárico eran asimétricos y los del racémico, simétricos. Al examinar al microscopio ambas series de cristales comprobó, con sorpresa, que ambas eran asimétricas. Pero los cristales de la sal del ácido racémico mostraban dos tipos de asimetría. La mitad de ellos eran de la misma forma que los de la sal del ácido tartárico (tartrato), y la otra mitad eran sus imágenes especulares. Por así decirlo, la mitad de los cristales de la sal del ácido racémico (racemato) eran zurdas, y la otra mitad, diestras.

Tediosamente, Pasteur separó ambas clases de cristales del racemato y luego disolvió separadamente cada una de ellas e hizo pasar la luz a través de cada solución. Ciertamente, la solución de los cristales que poseían la misma asimetría que los cristales de tartrato giraban el plano de la luz polarizada al igual que lo hacía el tartrato, manifestando la misma rotación específica. Aquellos cristales eran de tartrato. La otra serie de cristales giraban al plano de la luz polarizada en la dirección opuesta, con el mismo grado de rotación. El motivo por el cual el racemato original no determinaba la rotación de la luz era, por lo tanto, que las dos tendencias opuestas se neutralizaban entre sí.

Seguidamente, Pasteur volvió a convertir los dos tipos distintos de sal racemato en ácido, por adición de iones de hidrógeno a las soluciones respectivas. (Una sal es un compuesto en el cual algunos iones de hidrógeno de la molécula del ácido son remplazados por otros iones cargados positivamente, tales como los de sodio o potasio.) Halló que cada uno de esos ácidos racémicos eran entonces ópticamente activos —girando uno la luz polarizada en la misma dirección que el ácido tartárico lo hacía— (pues era el ácido tartárico) y el otro en la dirección opuesta.

Se hallaron otros pares de tales compuestos especulares («enantiomorfos», dos palabras griegas que significan «formas opuestas»). En 1863, el químico alemán Johannes Wislicenus halló que el ácido láctico (el ácido de la leche agria) formaba un par del mismo tipo. Además, mostró que las propiedades de las dos formas eran idénticas, salvo por su acción sobre la luz polarizada. Esto ha resultado ser una propiedad general para las sustancias enantiomorfas.

Estupendo, pero, ¿en dónde radicaba la asimetría? ¿Qué ocurría en las dos moléculas que determinaba que cada una de ellas fuera la imagen especular de la otra? Pasteur no pudo decirlo, y aunque Biot, que había sugerido la existencia de la asimetría molecular, vivió hasta los 88 años, no lo hizo lo suficiente como para ver confirmada su intuición.

En 1874, doce años después de la muerte de Biot, se ofreció finalmente una respuesta. Dos jóvenes químicos, un holandés de veintidós años de edad, llamado Jacobus Hendricus Van't Hoff y un francés de treinta y siete años llamado Joseph-Achille le Bel, independientemente aportaron una nueva teoría de los enlaces de valencia del carbono, que explicaba cómo podían estar construidas las moléculas enantiomorfas. (Más tarde en su carrera, Van't Hoff estudió el comportamiento de las sustancias en solución y mostró cómo las leyes que gobernaban su comportamiento se asemejaban a las leyes que gobernaban el comportamiento de los gases. Por este logro fue el primer hombre al que, en 1901, se le concedió el premio Nobel de Química.)

Kekulé había dibujado los cuatro enlaces del átomo de carbono en el mismo plano, no necesariamente debido a que ésta fuera la forma como se hallaba realmente dispuesto, sino porque aquél era el modo conveniente de dibujarlos sobre una lámina de papel. Entonces Van't Hoff y Le Bel sugirieron un modelo tridimensional, en el que los enlaces se hallaban dirigidos en dos planos perpendiculares entre sí, dos en un plano y dos en el otro. Una buena forma de obtener una imagen de esto es suponer que el átomo de carbono se halla apoyado en tres cualesquiera de sus enlaces como si fueran piernas, en cuyo caso el cuarto enlace se dirigía verticalmente hacia arriba (ver el dibujo más adelante). Si supone usted que el átomo de carbono se halla en el centro de un tetraedro (una figura geométrica con cuatro caras triangulares), entonces los cuatro enlaces se dirigirán hacia los cuatro vértices de la figura, motivo por el cual el modelo se denomina el «átomo de carbono tetraédrico».

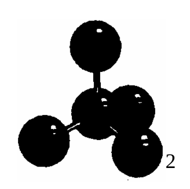
Ahora, permítasenos unir a estos cuatro enlaces dos átomos de hidrógeno, un átomo de cloro y un átomo de bromo. Independientemente de cuál es el átomo que unimos a un enlace, siempre obtenemos la misma disposición. Inténtelo y véalo. Se podrían representar los cuatro enlaces con cuatro palillos de los dientes insertados en un malvavisco (el átomo de carbono), en los ángulos adecuados. Ahora suponga que pincha dos olivas negras (los átomos de hidrógeno), una oliva verde (el cloro) y una cereza (bromo) en los extremos de los palillos, en cualquier orden. Digamos que, ahora, cuando se hace descansar esta estructura sobre tres patas, con una oliva negra en la cuarta, dirigida hacia arriba, el orden de las tres patas en la dirección de giro de las agujas de un reloj es oliva negra, oliva verde, cereza. Ahora puede girar la oliva verde y la cereza, de tal modo que el orden sea oliva negra, cereza, oliva verde. Pero, entonces, todo lo que necesita hacer para ver el mismo orden es girar la estructura de tal modo que la oliva negra que se hallaba en una de las patas se dirija hacia arriba en el aire, y aquella que se hallaba en el aire descanse sobre la mesa. Ahora el orden de las patas volverá a ser oliva negra, oliva verde, cereza.

En otras palabras, cuando por lo menos dos de los cuatro átomos (o grupos de átomos) unidos a los cuatro enlaces de carbono son idénticos, sólo es posible una disposición estructural. (Evidentemente esto es también así cuando son idénticos tres de ellos o la totalidad de los cuatro elementos unidos.)

Pero cuando la totalidad de los cuatro átomos (o grupos de átomos) unidos son distintos, la situación es diferente. En semejante caso son posibles dos disposiciones estructurales distintas, siendo una la imagen especular de la otra. Por ejemplo, supongamos que pincha una cereza en la pata dirigida hacia arriba y una oliva negra, una oliva verde y una cebollita para cóctel en las tres patas.

Si ahora gira la oliva negra y la oliva verde de tal modo que el orden en el sentido de giro de las agujas de reloj sea oliva verde, oliva negra, cebollita; no hay forma de que pueda girar la estructura para obtener el orden de oliva negra, oliva verde, cebollita, tal como la que existía antes que realizara el giro. Así, con cuatro elementos distintos unidos, siempre podrá formar dos estructuras distintas, siendo una de ellas la imagen especular de la otra. Inténtelo y lo comprobará.

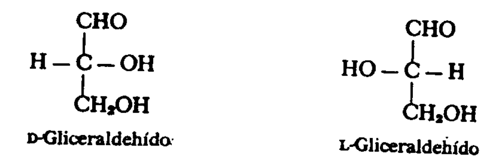
De este modo, Van't Hoff y Le Bel resolvieron el misterio de la asimetría de las sustancias ópticamente activas. Las sustancias enantiomorfas, que giran la luz en direcciones opuestas, son sustancias que contienen átomos de carbono con cuatro átomos o grupos de átomos distintos unidos a los enlaces. Una de las dos posibles disposiciones de estos cuatro elementos enlazados gira la luz polarizada hacia la derecha; la otra la gira hacia la izquierda. Más y más pruebas confirmaron maravillosamente el modelo tetraédrico del átomo de carbono de Van't Hoff y Le Bel y, hacia 1885 su teoría fue universalmente aceptada (gracias, en parte, al entusiasta apoyo del respetado Wislicenus).


[2]

La noción de la estructura tridimensional también fue aplicada a átomos distintos del carbono. El químico alemán Viktor Meyer aplicó satisfactoriamente dicha idea al nitrógeno, mientras que el químico inglés William Jackson Pope la aplicó al azufre, selenio y estaño. El químico suizo-alemán Alfred Werner añadió otros elementos, y, además, empezando en los años 90 del siglo XIX, elaboró una «teoría de la coordinación», en la que se explicaba la estructura de las sustancias inorgánicas complejas, al considerar cuidadosamente la distribución de los átomos y grupos atómicos en torno a algún átomo central. Por esta labor se le concedió a Werner el premio Nobel de Química, en 1913.

Los dos ácidos racémicos que Pasteur había aislado fueron denominados el ácido *d*-tartárico (de «dextrorrotación») y ácido *l*-tartárico (por «levorrotación»), y se escribieron fórmulas estructurales enantiomorfas para ellos. Pero, ¿cuál era cuál? ¿Cuál era realmente el compuesto dextrógiro y cuál el levógiro? En aquel entonces no había manera de decirlo.

Al objeto de proporcionar a los químicos un patrón modelo de comparación, para poder distinguir las distancias dextrógiras de las levógiras, el químico alemán Emil Fischer eligió un compuesto sencillo denominado «gliceraldehído», relacionado con los azúcares, que se encontraba entre los compuestos ópticamente activos estudiados con mayor amplitud. Arbitrariamente, asignó el carácter levorrotatorio a una forma que él denominó L-gliceraldehído, y el carácter dextrorrotatorio a su imagen especular, denominada el D-gliceraldehído. Sus fórmulas estructurales fueron:



Cualquier compuesto que mostrara por métodos químicos apropiados (más bien cuidadosos) que tenía una estructura relacionada con el L-gliceraldehído se consideraría que pertenecería a «la serie L» y tendría el prefijo «L» unido a su nombre, independientemente de si era levorrotatorio o dextrorrotatorio, por lo que a la luz polarizada se refería. Así resultó que la forma levorrotatoria del ácido tartárico pertenecía a la serie D en vez de a la serie L. (No obstante, un compuesto que pertenezca estructuralmente a la serie D, pero haga girar, la luz hacia la izquierda, tiene su nombre ampliado con los prefijos «D (-)». De forma semejante tenemos «D (+)», «L (-)» y «L (+)».)

Esta preocupación con las minucias de la actividad óptica ha resultado ser algo más que una cuestión de curiosidad malsana. Ocurre que casi la totalidad de los compuestos que existen en los organismos vivos contienen átomos de carbono asimétrico. Y, en cada caso, el organismo sólo utiliza una de las dos formas enantiomorfas del compuesto. Además, compuestos similares pertenecen por lo general a la misma serie. Por ejemplo, virtualmente la totalidad de los azúcares simples hallados en los tejidos vivos pertenecen a la serie D, mientras que virtualmente todos los aminoácidos, «los sillares de las proteínas», pertenecen a la serie L.

En 1955, un químico llamado J. M. Bijvoet determinó finalmente qué estructura tendía a hacer girar la luz polarizada a la izquierda y viceversa. Se puso de manifiesto que Fischer había, por casualidad, acertado en la denominación de las formas levorrotatoria y dextrorrotatoria.

Algunos años después del establecimiento seguro del sistema de Kekulé de las formas estructurales, se resistió a la formación un

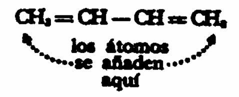
[2] El átomo tetraédrico de carbono.

compuesto con una molécula relativamente simple. Este compuesto era el benceno (descubierto en 1825 por Faraday). Las pruebas químicas mostraban que consistía de 6 átomos de carbono y 6 átomos de hidrógeno. ¿Qué ocurría con los restantes enlaces de carbono? (Seis átomos de carbono unidos unos a otros por enlaces simples podrían unir catorce átomos de hidrógeno, y lo hacen en el compuesto bien conocido denominado hexano, C_6H_{14}). Evidentemente, los átomos de carbono del benceno se hallaban unidos entre sí por enlaces dobles o triples. Así, el benceno podría tener una estructura tal como $CH \equiv C - CH = CH - CH = CH_2$.
Pero el problema era que los compuestos conocidos con tal tipo de estructura tenían propiedades totalmente distintas a las del benceno. Además, todas las pruebas químicas parecían indicar que la molécula de benceno era muy simétrica, y 6 carbonos y 6 hidrógenos no podían disponerse en una cadena en una forma razonablemente simétrica. En 1865, el propio Kekulé aportó la respuesta. Refirió algunos años más tarde que la visión de la molécula del benceno le vino mientras se hallaba en un coche y soñaba medio dormido. En su sueño, las cadenas de átomos de carbono parecían adquirir vida y danzar ante sus ojos, y luego, bruscamente, uno se enroscó sobre sí, mismo como una serpiente. Kekulé se despertó de su sueño al ponerse en marcha el vehículo, y podría haber gritado «¡eureka!». Tenía la solución: la molécula de benceno era un anillo. Kekulé sugirió que los 6 átomos de carbonó de la molécula se hallaban dispuestos de la manera siguiente:

Aquí, al menos, se hallaba la simetría requerida. Explicaba, entre otras cosas, por qué la sustitución por otro átomo de uno de los átomos de hidrógeno del benceno siempre daba lugar a un mismo producto. Ya que todos los carbonos en el anillo eran indistinguibles entre sí en términos estructurales, era Independiente que se realizara la sustitución en uno u otro de los átomos de hidrógeno sobre el anillo, ya que siempre se obtendría el mismo producto. En segundo lugar, la estructura anular mostraba que existían justamente tres formas en las que podrían remplazarse dos átomos de hidrógeno sobre el anillo: podrían realizarse sustituciones sobre dos átomos de carbono adyacentes en el anillo, sobre dos separados por un único átomo de carbono, o sobre dos separados por dos átomos de carbono. Evidentemente, se halló que podían obtenerse exactamente 3 isómeros disustituídos del benceno.
Sin embargo, la fórmula asignada por Kekulé a la molécula de benceno presentaba un espinoso problema. En general, los compuestos con dobles enlaces son más reactivos, es decir, más inestables, que aquellos con sólo enlaces sencillos. Es como si el enlace extra estuviera dispuesto y tendiera particularmente a desligarse del átomo de carbono y formar un nuevo enlace. Los compuestos con dobles enlaces adicionan fácilmente hidrógeno u otros átomos e incluso pueden ser degradados sin mucha dificultad. Pero el anillo de benceno es extraordinariamente estable: más estable que las cadenas de carbono con sólo enlaces simples. (En realidad, es tan estable y común en la materia orgánica que las moléculas que contienen anillos de benceno constituyen toda una clase de compuestos orgánicos, denominados «aromáticos», siendo incluidos todos los restantes dentro del grupo de los compuestos «alifáticos».) La molécula de benceno se resiste a la incorporación de más átomos de hidrógeno y es difícil lograr escindirla.
Los químicos orgánicos del siglo XIX no pudieron hallar una explicación para esta extraña estabilidad de los dobles enlaces en la molécula de benceno, y este hecho los trastornó considerablemente. Este problema puede parecer de escasa

importancia, pero todo el sistema de Kekulé de las formas estructurales se hallaba en peligro por la recalcitrante actitud de la molécula de benceno. La imposibilidad de explicar esta paradoja ponía en tela de juicio todo lo demás.

El planteamiento más próximo a una solución, antes del siglo xx, fue el del químico alemán Johannes Thiele. En 1899, sugirió que, cuando los enlaces dobles y los enlaces simples aparecen alternados, los extremos más próximos de un par de enlaces dobles se neutralizan entre sí de algún modo y se neutralizan recíprocamente su naturaleza reactiva. Consideremos, como ejemplo, el compuesto «butadieno», que contiene, en su forma más simple, dos enlaces dobles separados por un enlace simple («dobles enlaces conjugados»). Ahora, si se añaden dos átomos al compuesto, éstos se añaden en los carbonos de los extremos, tal como se muestra en la fórmula abajo representada. Tal punto de vista explicaba la no-reactividad del benceno, ya que los tres dobles enlaces de los anillos de benceno, al hallarse dispuestos en un anillo, se neutralizaban recíprocamente de forma absoluta.



Unos cuarenta años más tarde se halló una explicación mejor, al aplicar una nueva teoría de los enlaces químicos, que representaba a los átomos como unidos entre sí por electrones compartidos.

El enlace químico, que Kekulé había dibujado como un guión entre los átomos, aparecía ya representado por un par de electrones compartidos (véase capítulo V). Cada átomo que formaba una combinación con su vecino compartía uno de sus electrones con éste, y el vecino recíprocamente donaba uno de sus electrones al enlace. El carbono, con cuatro electrones en su capa más extensa, podía formar cuatro enlaces; el hidrógeno podía donar su electrón para formar un enlace con otro átomo, etc.

Ahora se planteaba la cuestión: ¿Cómo eran compartidos los electrones? Evidentemente, dos átomos de carbono comparten el par de electrones entre ellos de forma igual, debido a que cada átomo ejerce una atracción similar sobre los electrones. Por otra parte, en una combinación tal como el H_2O, el átomo de oxígeno, que ejerce una mayor atracción sobre los electrones que el átomo de hidrógeno, toma posesión de la mayor parte del par de electrones compartidos con cada átomo de hidrógeno. Esto significa que el átomo de oxígeno, debido a su excesiva riqueza en electrones, tiene un ligero exceso de carga negativa. Del mismo modo, el átomo de hidrógeno, que sufre de la deficiencia relativa de un electrón, tiene un ligero exceso de carga positiva. Una molécula que contenga un par oxígeno-hidrógeno, tal como el agua o el alcohol etílico, posee una pequeña concentración de cargas negativas en una parte de la molécula y una pequeña concentración de cargas positivas en otra. Posee dos polos de carga, por así decirlo, y por ello se la denomina una «molécula polar».

Este punto de vista sobre la estructura molecular fue propuesto por vez primera en 1912 por el químico holandés Peter Joseph Wilhelm Debye, quien más tarde prosiguió sus investigaciones en los Estados Unidos. Utilizó Un campo eléctrico para medir el grado en que estaban separados los polos de carga eléctrica en una molécula. En tal campo, las moléculas polares se alinean con los extremos negativos dirigidos hacia el polo positivo y los extremos positivos dirigidos hacia el polo negativo, y la facilidad con que esto se produce es la medida del «momento dipolar» de la molécula. Hacia principios de los años 30, las mediciones de los momentos dipolares se habían convertido en rutinarias, y en 1936, por éste y otros trabajos, Debye fue galardonado con el premio Nobel de Química.

La nueva imagen explicaba una serie de hechos que los puntos de vista anteriores sobre la estructura molecular no pudieron hacer. Por ejemplo, explicaba algunas anomalías de los puntos de ebullición de las sustancias. En general, cuanto mayor es el peso molecular, tanto mayor es el punto de ebullición. Pero esta regla muestra con frecuencia desviaciones. El agua, con un peso

molecular de sólo 18, hierve a 100º C, mientras que el propano, con más de dos veces su peso molecular (44), hierve a una temperatura mucho menor, a saber, la de –42º C. ¿Cómo podía ser esto? La respuesta consiste en que el agua es una molécula polar con un elevado momento dipolar, mientras que el propano es «no polar» —es decir, no tiene polos de carga—. Las moléculas polares tienden a orientarse ellas mismas con el polo negativo de una molécula adyacente al polo positivo de su vecina. La atracción electrostática resultante entre moléculas próximas hace más difícil separar a las moléculas entre sí y, de esta forma, tales sustancias tienen puntos de ebullición relativamente elevados. Esto explica el hecho de que el alcohol etílico tenga un punto de ebullición mucho más elevado (78º C) que su isómero, el dimetil éter, que hierve a los –24º C, aunque ambas sustancias tienen el mismo peso molecular (46). El alcohol etílico tiene un elevado momento dipolar y el dimetil éter sólo uno pequeño. El agua tiene un momento dipolar aún más grande que el del alcohol etílico.

Mientras que De Broglie y Schrödinger formulaban el nuevo punto de vista de que los electrones no eran partículas claramente definidas, sino haces de ondas (véase capítulo VII), la idea del enlace químico experimentó un nuevo cambio. En 1939, el químico norteamericano Linus Pauling presentó un concepto mecánico-cuántico del enlace molecular en un libro titulado *La naturaleza del enlace químico*. Su teoría explicaba finalmente, entre otras cosas, la paradoja de la estabilidad de la molécula de benceno.

Pauling representó los electrones que formaban un enlace como «resonando» entre los átomos que unían. Mostró que, bajo ciertas condiciones, era necesario considerar a un electrón como ocupando una entre distintas posiciones (con diversa probabilidad). El electrón, con sus propiedades ondulatorias, puede, por tanto, ser mejor representado como dispersado en una especie de mancha, que representa el promedio de las probabilidades individuales de posición. Cuanto más homogéneamente se hallara dispersado el electrón, tanto más estable sería el compuesto. Tal «estabilización de resonancia» ocurría más probablemente cuando la molécula poseía enlaces conjugados en un plano y cuando la existencia de simetría permitía una serie de posiciones alternativas para el electrón considerado como una partícula. El anillo de benceno es plano y simétrico. Pauling mostró que los enlaces del anillo no eran en realidad alternadamente dobles y simples, sino que los electrones se hallaban extendidos, por así decirlo, en una distribución igual, que se traducía en que todos los enlaces eran iguales y todos eran más fuertes y menos reactivos que los enlaces simples ordinarios. Las estructuras resonantes, aunque explican satisfactoriamente el comportamiento químico, son difíciles de representar en un simbolismo sencillo sobre el papel. Por tanto, todavía se utilizan de forma universal las antiguas estructuras de Kekulé, aunque ahora se entiende que sólo representan aproximaciones de la verdadera situación electrónica, y sin lugar a dudas seguirán siendo usadas en un futuro previsible.

Síntesis Orgánica

Después de que Kolbe hubo producido ácido acético, surgió, hacia 1850, un químico que, sistemáticamente y de forma metódica, intentó sintetizar las sustancias orgánicas en el laboratorio. Este fue el francés Pierre-Eugène-Marcelin Berthelot. Preparó una serie de compuestos orgánicos sencillos a partir de compuestos inorgánicos aún más simples, tales como el monóxido de carbono. Berthelot creó sus compuestos orgánicos simples aumentando la complejidad hasta que, finalmente, obtuvo entre otros al alcohol etílico. Fue «alcohol etílico sintético», pero absolutamente indiferenciable del «real», por cuanto era realmente alcohol etílico.

El alcohol etílico es un compuesto orgánico familiar a todos y, por lo general, muy apreciado por la mayoría. Sin duda, la idea de que el químico podía crear alcohol etílico a partir del carbono, aire y agua (carbón que aportaba el carbono, aire que aportaba el oxígeno y agua que proporcionaba el hidrógeno) sin necesidad de frutas o granos como punto de partida, debió de crear visiones

seductoras y envolver al químico con una nueva clase de reputación como milagrero. De cualquier forma, puso a la síntesis orgánica sobre el tapete.
Sin embargo, para los químicos, Berthelot hizo algo más importante. Empezó a formar productos que no existían en la Naturaleza. Tomó el «glicerol», un compuesto descubierto por Scheele en 1778, obtenido por la desintegración de las grasas de los organismos vivos, y lo combinó con ácidos de los que se desconocía su existencia de forma natural en las grasas (aunque existían naturalmente en cualquier lugar). De esta forma obtuvo sustancias grasas que no eran idénticas a aquellas que existían en los organismos.
Así, Berthelot creó las bases para un nuevo tipo de química orgánica: la síntesis de las moléculas que la Naturaleza no podía aportar. Esto significaba la posible formación de una clase de «sustancias sintéticas» que podían ser un sustituto —quizás un sustituto inferior— de algún compuesto natural que era difícil o imposible de obtener en la cantidad necesaria. Pero también significaba la posibilidad de «sustancias sintéticas» que mejoraran las existentes en la Naturaleza.
Esta idea de aventajar a la Naturaleza de una forma u otra, más que simplemente de suplementarla, ha crecido hasta proporciones colosales desde que Berthelot mostró el camino a seguir. Los primeros frutos en este nuevo campo se obtuvieron en el terreno de los colorantes.
Los comienzos de la química orgánica tuvieron lugar en Alemania. Wöhler y Liebig eran ambos alemanes, y otros hombres de gran capacidad los siguieron. Antes de mediados del siglo XIX, no existían químicos orgánicos en Inglaterra ni siquiera remotamente comparables a los de Alemania. En realidad, las escuelas inglesas tenían una opinión tan baja de la Química que hablaban sobre el tema sólo durante las horas de comida, no imaginando (o quizá deseando) que muchos estudiantes estuvieran interesados. Por lo tanto, es fruto del azar que la primera proeza en síntesis, con repercusiones universales, fuera realmente llevada a cabo en Inglaterra.
Se produjo de la siguiente forma. En 1845, cuando el *Royal College of Science*, en Londres, decidió finalmente dar un buen curso de Química, importó a un joven alemán para que enseñara, este era August Wilhelm von Hofmann, de sólo 27 años en aquel entonces, y fue elegido por sugerencia del esposo de la reina Victoria, el príncipe consorte Alberto (que era de origen alemán).
Hofmann estaba interesado en una serie de cuestiones, entre ellas el alquitrán, que había estudiado con motivo de su primer proyecto de investigación bajo la dirección de Liebig. El alquitrán es un material gomoso negro, obtenido a partir del carbón cuando éste se calienta intensamente en ausencia del aire. El alquitrán no es un material muy atractivo; pero constituye una valiosa fuente de sustancias químicas orgánicas. Por ejemplo, hacia 1840, sirvió como fuente de partida de grandes cantidades de benceno razonablemente puro y de un compuesto que contenía nitrógeno denominado «anilina», relacionado con el benceno, que Hofmann había sido el primero en obtener a partir del alquitrán.
Aproximadamente 10 años después de haber llegado a Inglaterra, Hofmann se tropezó con un muchacho de 17 años que estudiaba Química en el College. Su nombre era William Henry Perkin. Hofmann tenía buen ojo para el talento y conocía el entusiasmo cuando lo veía. Tomó al joven como ayudante y lo puso a trabajar en los compuestos del alquitrán. El entusiasmo de Perkin era inagotable. Construyó un laboratorio en su propio hogar y trabajó en él tanto como en el de la Escuela.
Hofmann, que también estaba interesado en las aplicaciones médicas de la química, pensó en voz alta, un día en 1856, sobre la posibilidad de sintetizar la quinina, una sustancia natural utilizada en el tratamiento de la malaria. Por aquel tiempo, aún no habían llegado los días en que se escribieran fórmulas estructurales. Lo único que se sabía acerca de la quinina era su composición, y nadie en aquel entonces tenía la más remota idea de cuán compleja podía ser su estructura. (Hasta 1908 no se dedujo correctamente la estructura de la quinina.)
Totalmente ignorante de su complejidad, Perkin, a la edad de 18 años, se enfrentó con el problema de sintetizar la quinina.

Comenzó con la aliltoluidina, uno de sus compuestos del alquitrán. Esta molécula parecía tener, aproximadamente, la mitad del número de los diversos tipos de átomos que poseía la quinina en su molécula. Unió dos de estas moléculas y añadió algunos de los átomos de oxígeno que faltaban (por adición de algo de dicromato potásico, que se sabía que adicionaba átomos de oxígeno a las sustancias químicas con las que entraba en contacto), dado que Perkin creía que de esta forma podría obtener una molécula de quinina.

Naturalmente, esto no condujo a Perkin a ningún lado. Terminó obteniendo una masa pegajosa, sucia y de color pardorrojizo. Luego intentó obtener la sustancia buscada con la anilina en vez de la aliltoluidina, y así consiguió una masa pegajosa de color negruzco. En esta ocasión, sin embargo, le pareció que contenía un cierto tinte purpúreo. Añadió alcohol al revoltijo y el líquido incoloro se convirtió en otro de un maravilloso color purpúreo. Enseguida, Perkin pensó en la posibilidad de que había descubierto algo que podía servir como colorante. Éstas siempre han sido sustancias muy admiradas y costosas. Sólo existían unos pocos colorantes buenos, colorantes que teñían los productos fabricados de forma permanente y brillante, sin desaparecer con el lavado. Éstos eran el índigo azul negruzco, de la planta índigo, y el íntimamente relacionado «gualda» por el que las Islas Británicas fueron famosas ya en los antiguos tiempos romanos; existía la «púrpura de Tiro», procedente de un caracol (así denominada, debido a que la antigua Tiro se enriqueció fabricándola; en el Imperio romano que vino posteriormente, los niños de casa real nacían en una habitación con colgaduras coloreadas con la púrpura de Tiro, y de ahí la frase «nacido entre púrpura»); y existía la alizarina rojiza, de la planta rubia («alizarina» procede de las palabras árabes que significan «el jugo»). A estas herencias de los tiempos antiguos y medievales, los ulteriores tintoreros añadieron unos pocos colorantes tropicales y pigmentos orgánicos (utilizados hoy en día sobre todo en pinturas).

Esto explica la excitación de Perkin acerca de la posibilidad de que su sustancia púrpura pudiera ser un colorante. Por la sugerencia de un amigo, envió una muestra a una empresa en Escocia que estaba interesada en colorantes, y rápidamente recibió la respuesta de que el compuesto púrpura tenía buenas propiedades. ¿Podía proporcionarla a un precio módico? Seguidamente. Perkin procedió a patentar el colorante (existieron considerables controversias acerca de si un muchacho de 18 años podía obtener una patente, pero finalmente la obtuvo), dejar la escuela y entrar en los negocios.

Su proyecto no era fácil. Perkin tenía que empezar desde el principio, preparando sus propios materiales básicos a partir del alquitrán, con un equipo diseñado por él mismo. No obstante, en el curso de 6 meses estaba ya fabricando lo que él denominó «púrpura de anilina» un compuesto no hallado en la Naturaleza y superior a cualquier colorante natural en su gama de colores. Los tintoreros franceses, que adoptaron el nuevo colorante más rápidamente que los más conservadores ingleses, llamaron al color *mauve*, de la malva (del latín «malva»), y el colorante fue denominado la «mauveína». Rápidamente se inició la carrera (siendo denominado algunas veces este período como la «Década Mauve»), y Perkin se hizo rico. A la edad de 23 años, era la autoridad mundial en colorantes.

Se había roto el dique. Una serie de químicos orgánicos, inspirados en el sorprendente éxito de Perkin, se dedicaron a sintetizar colorantes y muchos obtuvieron resultados positivos. El propio Hofmann dirigió su atención hacia el nuevo campo, y, en 1858, sintetizó un colorante rojo púrpura que fue denominado posteriormente «magenta» por los tintoreros franceses (entonces como ahora, los árbitros de las modas del mundo). El colorante recibió este nombre por la ciudad italiana donde los franceses vencieron a los austríacos en una batalla en 1859.

Hofmann volvió a Alemania en 1865, llevando con él su interés hacia los colorantes violetas, todavía conocidos como «violetas de Hofmann». Hacia mediados del siglo xx se hallaban en uso comercial no menos de 3.500 colorantes sintéticos.

Así pues, los químicos sintetizaban ya los colorantes naturales en el laboratorio. Karl Graebe, de Alemania, y Perkin sintetizaron la alizarina en 1869 (Graebe obtuvo la patente un día antes que Perkin) y, en 1880, el químico alemán Adolf von Baeyer elaboró un método de síntesis del índigo. (Por su trabajo sobre colorantes, Baeyer recibió el premio Nobel de Química en 1905.)

Perkin se retiró de los negocios en 1874, a la edad de 35 años, y regresó a su primitivo amor, la investigación. Hacia 1875, había conseguido sintetizar la cumarina (una sustancia existente en la Naturaleza que tenía un agradable olor de heno recién segado); constituyó el comienzo de la industria de los perfumes sintéticos. Perkin solo no podía mantener la supremacía británica frente al gran desarrollo de la química orgánica alemana y, a finales de siglo, las «sustancias sintéticas» se convirtieron casi en un monopolio alemán. Fue un químico alemán, Otto Wallach, quien efectuó estudios sobre los perfumes sintéticos, que había iniciado Perkin. En 1910. Wallach fue galardonado con el premio Nobel de Química por sus investigaciones. El Químico croata Leopold Ruzicka, profesor en Suiza, sintetizó por vez primera el almizcle, un importante componente de los perfumes. Compartió el premio Nobel de Química en 1939 (con Butenandt). Sin embargo, durante la Primera Guerra Mundial, Gran Bretaña y los Estados Unidos, desprovistos de los productos de los laboratorios químicos alemanes, se vieron forzados a desarrollar industrias químicas propias.

Los logros en la química orgánica sintética se habrían sucedido en el mejor de los casos a tropezones, si los químicos hubieran tenido que depender de accidentes afortunados tales como aquel que había sido convenientemente aprovechado por Perkin. Por suerte, las fórmulas estructurales de Kekulé, presentadas tres años después del descubrimiento de Perkin, hicieron posible preparar modelos, por así decirlo, de la molécula orgánica. Los químicos ya no precisaban preparar la quinina basándose en simples conjeturas y la esperanza; tenían métodos para intentar escalar las alturas estructurales de la molécula, fase a fase, con previo conocimiento de hacia a dónde se dirigían y de lo que podían esperar.

Los químicos aprendieron a transformar un grupo de átomos en otro, mediante un proceso de alteración. A abrir anillos de átomos y formar anillos a partir de cadenas abiertas; a separar entre sí grupos de átomos; y a añadir átomos de carbono, uno a uno, a una cadena. El método específico de realizar una tarea arquitectónica particular dentro de la molécula orgánica todavía se califica con frecuencia con el nombre del químico que por primera vez ha descrito los detalles. Por ejemplo, Perkin descubrió un método de adición de un grupo de dos átomos de carbono, por calentamiento de ciertas sustancias con los reactivos químicos llamados anhídrido acético y acetato sódico. A ésta se la denomina «reacción de Perkin». El maestro de Perkin, Hofmann, descubrió que un anillo de átomos que incluía un nitrógeno podía ser tratado con una sustancia denominada yoduro de metilo en presencia de un compuesto de plata, de tal forma que el anillo se rompía y se eliminaba con ello el átomo de nitrógeno. Ésta es la «degradación de Hofmann». En 1877, el químico francés Charles Friedel, trabajando con el químico norteamericano James Mason Crafts, descubrió una forma de unir una cadena corta de átomos de carbono a un anillo de benceno, utilizando calor y el cloruro de aluminio. A ésta se le denomina ahora la «reacción de Friedel-Crafts».

En 1900, el químico francés Victor Grignard descubrió que el metal magnesio, apropiadamente utilizado, podía realizar una considerable variedad de diferentes adiciones de cadenas de carbono; presentó el descubrimiento en su tesis doctoral. Por el desarrollo de estas «reacciones de Grignard» compartió el premio Nobel de Química en 1912. El químico francés Paul Sabatier, que lo compartió con él, había descubierto (junto con J. B. Senderens) un método en el que se utilizaba níquel finamente dividido para determinar la adición de átomos de hidrógeno en aquellos lugares en los que una cadena de átomos de carbono poseía un doble enlace. Ésta es la «reducción de Sabatier-Senderens».

En 1928, los químicos alemanes Otto Diels y Kurt Alder descubrieron un método de adición de los dos extremos de una cadena de carbono a los extremos opuestos de un doble enlace en

otra cadena de carbono, formando así un anillo de átomo. Por el descubrimiento de esta «reacción Diels-Alder», compartieron en 1950 el premio Nobel de Química.

En otras palabras, anotando las variaciones en las fórmulas estructurales de sustancias sometidas a una serie de condiciones y reactivos químicos, los químicos orgánicos elaboraron una serie de reglas fundamentales, cuyo número crece lentamente, sobre cómo modificar un compuesto en otro a voluntad. Esto no era sencillo. Cada compuesto y cada cambio tenía sus propias peculiaridades y dificultades. Pero las vías principales habían sido abiertas, y el químico orgánico experimentado halló claros signos hacia el progreso en lo que anteriormente parecía una jungla.

Para aclarar la estructura de compuestos desconocidos también pudo ser utilizado el conocimiento de la forma en que se comportan los grupos particulares de átomos.

Por ejemplo, cuando los alcoholes sencillos reaccionan con el sodio metálico y liberan hidrógeno, sólo se libera el hidrógeno unido a un átomo de oxígeno, no los hidrógenos unidos a los átomos de carbono. Por otra parte, algunos compuestos orgánicos tomarán átomos de hidrógeno en condiciones apropiadas, mientras que otros no lo harán. Se pone de manifiesto que los compuestos que añaden hidrógeno generalmente poseen enlaces dobles o triples y añaden el hidrógeno a estos enlaces. A partir de tal información, se originó un tipo totalmente nuevo de análisis químico de los compuestos orgánicos; se determinó la naturaleza de los grupos de átomos, más que el número y los tipos de diversos átomos presentes. La liberación de hidrógeno por adición de sodio significa la presencia de un átomo de hidrógeno unido al oxígeno en el compuesto; la adición de hidrógeno significa la presencia de enlaces dobles o triples. Si la molécula era demasiado complicada para su análisis global, podía ser escindida en porciones más simples mediante métodos bien definidos; las estructuras de las porciones más simples podían ser aclaradas y a partir de ellas deducirse la molécula original.

Utilizando la fórmula estructural como una herramienta y guía, los químicos pudieron deducir la estructura de algunos compuestos orgánicos de utilidad, existentes en la Naturaleza (análisis) y luego intentar duplicarlo o crear un compuesto algo similar en el laboratorio (síntesis). De todo ello resultó que lo raro, caro o difícil de obtener en la Naturaleza podía obtenerse a bajo precio y en cantidad en el laboratorio. O, como en el caso de los colorantes de alquitrán, el laboratorio podía crear algo qué satisficiera la necesidad mejor que lo hacían otras sustancias similares halladas en la Naturaleza.

Un caso sorprendente de deliberada superación de la Naturaleza se refiere a la cocaína, hallada en las hojas de la planta coca, que es nativa de Bolivia y Perú, pero que en la actualidad crece sobre todo en Java. Al igual que los compuestos estricnina, morfina y quinina, todos ellos mencionados anteriormente, la cocaína es un ejemplo de «alcaloide», un producto vegetal que contiene nitrógeno y que, a pequeña concentración, ejerce profundos efectos fisiológicos sobre el ser humano. Según la dosis, los alcaloides pueden curar o matar. La más famosa de todas las muertes ocurridas por alcaloides ha sido la de Sócrates, que murió a causa de la «coniína», un alcaloide presente en la cicuta.

En algunos casos, la estructura molecular de los alcaloides es extraordinariamente compleja, pero precisamente esto suscitaba la curiosidad de los químicos. El químico inglés Robert Robinson estudió los alcaloides sistemáticamente. Desarrolló la estructura de la morfina (en su totalidad salvo en un átomo dudoso) en 1925, y la estructura de la estricnina en 1946. Recibió el premio Nobel de Química en 1947, como reconocimiento al valor de su trabajo.

Robinson simplemente había desarrollado la estructura de los alcaloides usando aquella estructura como guía para su síntesis. El químico norteamericano Robert Burns Woodward se percató de ello. Con su colega y compatriota William von Eggers Doering, sintetizó la quinina en 1944. Fue la azarosa búsqueda de este particular compuesto por parte de Perkin lo que había tenido cómo consecuencia tan tremendos resultados. Y, por si es usted curioso, ésta es la fórmula estructural de la quinina:

No es raro que Perkin tropezara en ella.
Si Woodward y Von Doering resolvieron el problema, no fue simplemente a causa de sus brillantes dotes. Tenían a su disposición las nuevas teorías electrónicas de la estructura y comportamiento molecular elaboradas por hombres tales como Pauling. Woodward se dedicó a sintetizar una serie de moléculas complicadas, que hasta entonces habían representado metas inalcanzables. Por ejemplo, en 1954, sintetizó la estricnina.
Sin embargo, mucho antes de que la estructura de los alcaloides fuera dilucidada, algunos de ellos, especialmente la cocaína, merecieron un profundo interés por parte de los médicos. Se había descubierto que los indios sudamericanos podían mascar hojas de coca, hallando en ello un antídoto contra la fatiga y una fuente de sensación de felicidad. El médico escocés Robert Christison introdujo la planta en Europa. (No es la única aportación a la Medicina por parte de los brujos y herboristas de las sociedades precientíficas. También lo son la quinina y la estricnina ya mencionadas, así como el opio, la digital, el curare, la atropina, la estrofantina y la reserpina. Además.,el hábito de fumar tabaco, de mascar areca, de beber alcohol y de tomar drogas tales como la marihuana y el peyote son todos ellos hábitos heredados de sociedades primitivas.)
La cocaína no era simplemente un productor de felicidad general. Los médicos descubrieron que liberaba al cuerpo, temporal y localmente, de las sensaciones dolorosas. En 1884, el médico estadounidense Carl Koller descubrió que la cocaína podía ser utilizada como un analgésico local cuando se aplicaba a las membranas mucosas en torno al ojo. Las operaciones oculares pudieron efectuarse entonces sin dolor. La cocaína también pudo utilizarse en odontología, permitiendo que se extrajeran los dientes sin dolor.
Esto fascinó a los médicos, pues una de las grandes victorias médicas del siglo XIX había sido aquélla obtenida sobre el dolor. En 1799, Humphry Davy había preparado el gas «óxido nitroso» (ON_2) y estudiado sus efectos. Halló que el inhalarlo eliminaba las inhibiciones de tal modo que las personas que lo habían respirado reían, lloraban o actuaban alocadamente. De ahí su nombre de «gas hilarante».
Hacia 1840, un científico norteamericano, Gardner Quincy Cotton, descubrió que el óxido nitroso hacía desaparecer la sensación de dolor y, en 1844, el dentista también del mismo país, Horace Wells, lo utilizó en odontología. Por aquel entonces, algo mejor había entrado en escena.
El cirujano estadounidense Crawford Williamson Long, en 1842, había utilizado el éter para hacer dormir a un paciente durante una extracción dental. En 1846, un compatriota de Long, el dentista William Thomas Green Morton, efectuó una operación quirúrgica utilizando éter, en el Hospital General de Massachusetts. Morton, por lo general, ha merecido los honores del descubrimiento, debido a que Long no describió su proeza en las revistas médicas hasta después de la demostración pública de Morton, y las demostraciones públicas anteriores de Wells con el óxido nitroso habían sido sólo éxitos vistos con indiferencia.
El poeta y médico norteamericano Oliver Wendell Holmes sugirió que a los compuestos que suprimían el dolor se los denominara «anestésicos» (de las palabras griegas que significan «sin sensación»). Algunas personas en aquel entonces creían que los anestésicos eran un intento sacrílego de evitar el dolor infligido a la Humanidad por Dios, pero, si alguna cosa se necesitaba para hacer a la anestesia respetable, fue su uso, por el médico escocés James Young Simpson, en la reina Victoria de Inglaterra, durante el parto.
Finalmente, la anestesia había elevado a la cirugía desde una carnicería realizada en una cámara de tortura hasta algo que, al

menos, tenía una apariencia humana, y, con la adición de las condiciones antisépticas, hasta incluso como salvador de vidas. Por este motivo fue seguido con gran interés cualquier nuevo avance en la anestesia. La especial atención mostrada hacia la cocaína era debido a que se trataba de un «anestésico local», que suprimía el dolor, en una zona específica, sin producir una inconsciencia y falta de sensación general, como ocurría en el caso de «los anestésicos generales» tales como el éter.

Sin embargo, la cocaína tiene varios inconvenientes. En primer lugar, puede provocar peligrosos efectos secundarios e incluso matar a los pacientes demasiado sensibles a ella. En segundo lugar, puede producir hábito; por lo que debe ser utilizada moderadamente y con precaución. (La cocaína es uno de los peligrosos «estupefacientes» o «narcóticos», que no sólo suprimen el dolor, sino también otras sensaciones no placenteras y proporcionan al que los experimenta la ilusión de euforia. El sujeto puede así acostumbrarse tanto a esto que puede requerir dosis cada vez mayores y, a pesar del efecto perjudicial real que la droga produce sobre su organismo, llegar a depender tanto de las ilusiones que provoca, que no consigue prescindir de ella sin desarrollar dolorosos «síntomas de supresión». Tal «habituación» a la cocaína y otros fármacos de este tipo es un importante problema social. Anualmente, más de 20 toneladas de cocaína son producidas ilegalmente y vendidas con enormes beneficios para unos pocos y una tremenda miseria para muchos, a pesar de los esfuerzos mundiales realizados para evitar este tráfico.) En tercer lugar, la molécula de cocaína es frágil y, calentando la droga para esterilizarla de cualquier bacteria, se producen modificaciones en su molécula que interfieren con sus efectos anestésicos. La estructura de la molécula de cocaína es más bien complicada:

El anillo doble en el lado izquierdo es la porción frágil, y ahí radica la dificultad de sintetizarla. (La síntesis de la cocaína no se logró hasta el año 1923, en que la llevó a cabo el químico alemán Richard Willstätter.) Sin embargo, se les ocurrió a los químicos que podían sintetizar compuestos similares en los que el anillo doble no estuviera cerrado. Esto podría hacer que el compuesto fuera más fácil de obtenerse y más estable. La sustancia sintética podría poseer, quizá, las propiedades anestésicas de la cocaína, sin sus efectos colaterales indeseables.

Durante unos 20 años, los químicos alemanes estuvieron atacando el problema, creando docenas de compuestos, algunos de ellos francamente excelentes. La modificación más satisfactoria fue obtenida en 1909, al preparar un compuesto con la siguiente fórmula:

Compárese ésta con la fórmula para la cocaína y se verá la semejanza, junto con el importante hecho de que el anillo doble ya no existe. Esta molécula más simple, de naturaleza estable, fácil de sintetizar, con buenas propiedades anestésicas y muy escasos efectos secundarios no existe en la Naturaleza. Es un «derivado sintético», mucho mejor que la sustancia real. Se le denomina

«procaína», pero el público lo conoce mucho mejor por su nombre comercial de «Novocaína».
Quizás, entre los anestésicos generales, el mejor conocido y más eficaz sea la morfina. Su nombre procede de la palabra griega para significar el «sueño». Es un derivado purificado del jugo de opio o «láudano», utilizado durante siglos por las gentes, tanto civilizadas como primitivas, para combatir los dolores y las tensiones del mundo cotidiano. Como remedio para el paciente sumido en el dolor, es una bendición de los cielos; pero también lleva con ella el mortal peligro de la habituación. Un intento realizado para hallar un sustituto de ella, fracasó estruendosamente. En 1898, un derivado sintético, la «diacetilmorfina», más conocida como «heroína», fue introducida, en la creencia de que podía ser más segura. Por el contrario, resultó la droga más peligrosa de todas.
«Sedantes» (inductores del sueño) menos peligrosos son el hidrato de cloral y, en particular, los barbitúricos. El primer ejemplo de este último grupo fue introducido en 1902, y ahora son los constituyentes más frecuentes de las «píldoras para dormir». Bastante innocuos cuando se utilizan apropiadamente, pueden, no obstante, crear hábito, y una dosis excesiva causa la muerte. En realidad, ya que la muerte llega suavemente, como el producto final de un sueño cada vez más profundo, la sobredosificación de barbitúricos es un método bastante popular de suicidio, o de intento de llevarlo a cabo.
El sedante más frecuente, y de mayor uso, es, por supuesto, el alcohol. Los métodos para fermentar los jugos de frutas y granos se conocían ya en tiempos prehistóricos, así como también la destilación para fabricar licores más fuertes de los que podían producirse naturalmente. El valor de los vinos suaves en aquellas regiones donde la provisión de agua no es más que un corto camino hacia la fiebre tifoidea y el cólera, y la aceptación social de la bebida con moderación, hizo difícil considerar el alcohol como fármaco que es, aunque induce al hábito con la misma seguridad que la morfina y, cuando se consume en cantidad, produce muchos más daños. Sin embargo, la prohibición legal de la venta de licores parece ser una medida condenada al fracaso; ciertamente, la experiencia americana de la «Prohibición» (1920-1933) representó un fracaso desastroso. No obstante, el alcoholismo está siendo tratado cada vez más como una auténtica enfermedad y no como una desgracia moral. Los síntomas agudos del alcoholismo *(delirium tremens)* probablemente no se deben tanto al alcohol en sí mismo, como a las deficiencias vitamínicas producidas en aquellos que comen poco y beben mucho.
El ser humano dispone ahora de toda suerte de productos sintéticos de gran uso y abuso potencial. Un sinfín de explosivos, gases venenosos, insecticidas, germicidas, antisépticos, desinfectantes, detergentes, fármacos... Pero la síntesis no es simplemente la asistenta de las necesidades del consumidor. También puede colocarse al servicio de la investigación química pura.
A menudo ocurre que a un compuesto complejo, producido, bien por los tejidos vivos o por un químico orgánico, sólo se le puede asignar una estructura molecular probable, después de haberse efectuado todas las posibles deducciones a partir de la naturaleza de las reacciones que experimenta. En este caso, una forma de intentar resolver el problema es sintetizar un compuesto mediante las reacciones conocidas para producir una estructura similar a aquella que ha sido deducida. Si las propiedades del compuesto resultante son idénticas a las del compuesto que se está investigando, la estructura asignada se convierte en algo sobre lo que el químico puede basar su confianza. Un caso demostrativo a este respecto es el de la hemoglobina, el principal componente de los hematíes de la sangre y el pigmento que da a ésta su color rojo. En 1831, el químico francés L. R. LeCanu escindió la hemoglobina en dos partes, de las cuales la porción más pequeña, llamada «heme», constituía el 4 % de la masa de la hemoglobina. Se halló que el heme tenía la fórmula empírica $C_{34}H_{32}O_4N_4Fe$. Se sabía que compuestos tales como el heme existían en otras sustancias de importancia vital, tanto en el reino vegetal como en el animal y, por ello, la estructura de la molécula despertó sumo interés entre los bioquímicos. Sin embargo, durante casi un siglo

después del aislamiento de LeCanu del heme, todo lo que podía hacerse era fragmentarlo en moléculas más pequeñas.
El átomo de hierro (Fe) podía eliminarse fácilmente, y lo que restaba se disgregaba luego en fragmentos que representaban aproximadamente la cuarta parte de la molécula original. Se halló que esos fragmentos eran «pirroles», moléculas constituidas por anillos de cinco átomos, de los cuales cuatro eran de carbono y uno de nitrógeno.
El propio pirrol tiene la siguiente estructura:

Los pirroles obtenidos a partir del heme poseen pequeños grupos de átomos que contienen uno o dos átomos de carbono unidos al anillo, en lugar de uno o más átomos de hidrógeno.
En la década de 1920-1930, el químico alemán Hans Fischer atacó el problema. Ya que los pirroles tenían unas dimensiones que eran aproximadamente la cuarta parte del heme original, decidió intentar combinar 4 pirroles para comprobar qué sucedía. Lo que finalmente obtuvo fue un compuesto con 4 anillos que denominó «porfina» (de la palabra griega que significa «púrpura», debido a su color púrpura). La porfina tiene una estructura similar a:

Sin embargo, los pirroles obtenidos a partir del heme, en primer lugar contenían pequeñas «cadenas laterales» unidas al anillo. Éstas permanecían unidas a ellos cuando los pirroles se unían para formar la porfina. La porfina con varias cadenas laterales unidas daba lugar a un familiar de compuestos denominados las «porfirinas». Al comparar las propiedades del heme con aquellas de las porfirinas que él había sintetizado, a Fischer le resultó evidente que el heme (menos su átomo de hierro) era una porfirina. Pero, ¿cuál? Según los razonamientos de Fischer, al menos podían formarse 15 compuestos a partir de los diversos pirroles obtenidos del heme, y cualquiera de esos 15 podía ser el propio heme.
Podría obtenerse una respuesta irrefutable sintetizando los 15 y estudiando las propiedades de cada uno de ellos. Fischer puso a sus discípulos al trabajo, preparando mediante tediosas reacciones químicas lo que permitía sólo que se formara una estructura particular, una de las 15 posibilidades. Una vez formada cada diferente porfirina, comparó sus propiedades con aquellas de la porfirina natural del heme.
En 1928, descubrió que la porfirina con el número IX en su serie era la que había estado buscando. La variedad natural de porfirina es desde entonces llamada la «porfirina IX». Fue un procedimiento simple convertir la porfirina IX en heme, añadiéndole hierro. Los químicos, al menos, tienen la confianza de que conocen la estructura de ese importante compuesto. Ésta es la estructura del heme, tal como la dilucidó Fischer:

Por su logro, se otorgó a Fischer el premio Nobel de Química en 1930.
Aún siendo muy notables los éxitos de la química orgánica sintética durante el siglo XIX y la primera mitad del XX, todos ellos se debieron al mismo proceso utilizado por los alquimistas de épocas pretéritas: mezcla y calentamiento de sustancias. El calor representó un medio seguro de inyectar energía a las moléculas y hacerlas actuar entre sí, aunque tales interacciones fueron usualmente de naturaleza errática y se produjeron por conducto de agentes intermediarios, efímeros e inestables, cuya esencia sólo fue definible a base de conjeturas.
Lo que necesitaban los químicos era un método más alambicado y directo para producir moléculas energéticas; es decir, un sistema mediante el cual todas las moléculas se movieran aproximadamente a la misma velocidad y en la misma dirección. Esto eliminaría la naturaleza errática de las interacciones, pues entonces, todo cuanto hiciera una molécula lo harían también las demás. Un procedimiento aceptable podría consistir en acelerar los iones dentro de un campo eléctrico, tal como se aceleran las partículas subatómicas en los ciclotrones.
En 1964, el químico germano-americano Richard Leopold Wolfgang consiguió acelerar moléculas e iones hasta hacerlas adquirir energías muy elevadas y, por medio de lo que podríamos denominar un «acelerador químico» produjo velocidades iónicas solamente alcanzables mediante el calor a temperaturas comprendidas entre los 10.000º y l00.000º C. Por añadidura, todos los iones se trasladaron en la misma dirección.
Si se provee a los iones así acelerados con una carga de electrones que ellos puedan captar, se los convertirá en moléculas neutras cuyas velocidades de traslación serán todavía muy considerables. Fue el químico norteamericano Leonard Wharton quien produjo esos rayos neutros el año 1969.
Respecto a las breves fases intermedias de la reacción química, las computadoras podrían ser de utilidad. Fue preciso elaborar las ecuaciones de mecánica cuántica que gobiernan el estado de los electrones en diferentes combinaciones atómicas, y prever los acontecimientos que sobrevendrían cuando se produjese la colisión. Por ejemplo, en 1968, una computadora manipulada por el químico estadounidense de origen italiano Enrico Clementi «hizo colisionar» amoníaco y ácido clorhídrico en circuito cerrado de televisión para formar cloruro amónico. Asimismo, la computadora anunció los consecutivos acontecimientos e indicó que el cloruro amónico resultante podría existir como gas de alta presión a 700º C. Ésta fue una información inédita, cuya verificación experimental se llevó a cabo pocos meses después.
En la última década., los químicos han forjado flamantes instrumentos, tanto de carácter teórico como experimental. Ahora se conocerán recónditos pormenores de las reacciones y se elaborarán nuevos productos inasequibles hasta el presente o, si acaso, asequibles en porciones ínfimas. Tal vez nos hallemos en el umbral de un mundo prodigioso e insospechado.

Polímeros Y Plásticos

Cuando consideramos moléculas similares a las del heme y la quinina estamos alcanzando un grado tal de complejidad, que incluso el químico moderno experimenta grandes dificultades en dilucidarla. La síntesis de tales compuestos requiere tantas fases y una variedad tal de procedimientos, que difícilmente podemos esperar producirlo en cantidad, sin la colaboración de algún organismo vivo (excepto el propio químico). Sin embargo, esto no debe crear un complejo de inferioridad. El propio tejido vivo alcanza el límite de su capacidad a este nivel de complejidad. Pocas moléculas en la naturaleza son más complejas que las del heme y la quinina.

Realmente, existen sustancias naturales compuestas de cientos de miles e incluso de millones de átomos, pero no son moléculas individuales, por así decirlo, construidas de una pieza. Más bien estas moléculas están formadas por sillares unidos, al igual que las cuentas de un collar. Por lo general, el tejido vivo sintetiza algún compuesto pequeño, relativamente simple, y luego se limita a sujetar las unidades entre sí formando cadenas. Y esto, como veremos, también puede hacerlo el químico.

En el tejido, esta unión de moléculas pequeñas («condensación») se acompaña usualmente de la eliminación de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno (que se combinan para formar una molécula de agua) en cada punto de unión. Invariablemente, el proceso puede ser reversible (tanto en el organismo como en el tubo de ensayo): por la adición de agua, las unidades de la cadena pueden soltarse y separarse. Esta inversión de la condensación se denomina «hidrólisis», de las palabras griegas que significan «separación por el agua». En el tubo de ensayo, la hidrólisis de estas largas cadenas puede ser acelerada por una serie de métodos, siendo el más común la adición de una cierta cantidad de ácido a la mezcla.

La primera investigación de la estructura química de una molécula grande se remonta al año 1812, cuando el químico ruso Gottlieb Sigismund Kirchhoff halló que, hirviendo el almidón con ácido, producía un azúcar idéntico en sus propiedades a la glucosa, azúcar éste obtenido a base de uvas. En 1819, el químico francés Henri Braconnot también obtuvo glucosa por ebullición de diversos productos vegetales tales como serrín, lino y cortezas, todos los cuales contienen un compuesto llamado «celulosa».

Fue fácil suponer que ambos, el almidón y la celulosa, estaban formados por unidades de glucosa, pero los detalles de la estructura molecular del almidón y la celulosa tuvieron que esperar al conocimiento de la estructura molecular de la glucosa.

Al principio, antes de los días de las fórmulas estructurales, todo lo que se sabía de la glucosa era su fórmula empírica, $C_6H_{12}O_6$. Esta proporción sugería que existía una molécula de agua, H_2O, unida a cada uno de los átomos de carbono. Por lo tanto, la glucosa y los compuestos similares a ella en estructura fueron denominados «hidratos de carbono» («carbón hidratado»).

La fórmula estructural de la glucosa fue dilucidada en 1886 por el químico alemán Heinrich Kiliani. Mostró que su molécula estaba constituida por una cadena de 6 átomos de carbono, a la que se unían separadamente átomos de hidrógeno y grupos de oxígeno-hidrógeno. No existían combinaciones de agua propiamente dichas en ningún lado de la molécula.

En la siguiente década, el químico alemán Emil Fischer estudió detalladamente la glucosa y estableció la disposición exacta de los grupos de oxígeno-hidrógeno en torno a los átomos de carbono, cuatro de los cuáles eran asimétricos. Existen 16 posibles disposiciones de estos grupos y, por tanto, 16 isómeros ópticos posibles, cada uno con sus propiedades características. Los químicos, por supuesto, han elaborado los dieciséis, de los cuales sólo unos pocos existen realmente en la Naturaleza. Como consecuencia de su labor sobre la actividad óptica de estos azúcares, Fischer sugirió la existencia de las series —L y —D de compuestos. Por haber proporcionado unas sólidas bases estructurales a la química de los hidratos de carbono. Fischer recibió el premio Nobel de Química en 1902.

Éstas son las fórmulas estructurales de la glucosa y de otros dos azúcares corrientes, a saber, la fructosa y la galactosa:

glucosa	fructosa	galactosa
$CH=O$	CH_2-OH	$CH=O$
$H-C-OH$	$C=O$	$H-C-OH$
$HO-C-H$	$HO-C-H$	$HO-C-H$
$H-C-OH$	$H-C-OH$	$HO-C-H$
$H-C-OH$	$H-C-OH$	$H-C-OH$
CH_2-OH	CH_2-OH	CH_2-OH

Una vez los químicos conocieron la estructura de los azúcares simples, fue relativamente fácil desarrollar la forma en que se unían para dar lugar a compuestos más complejos. Por ejemplo, una molécula de glucosa y una de fructosa pueden condensarse para formar el disacárido sacarosa: el azúcar que utilizamos en la mesa. La glucosa y la galactosa se combinan para formar la lactosa, que existe en la Naturaleza sólo en la leche.

No existe razón alguna por la que tales condensaciones no pueden continuar indefinidamente, y esto es lo que ocurre en el almidón y la celulosa. Cada uno de ellos consiste en largas cadenas de unidades de glucosa condensadas según un determinado modelo. Los detalles de este modelo son importantes, debido a que, aún cuando ambos compuestos son formados por la misma unidad, difieren profundamente entre sí. El almidón, en una u otra forma, constituye la mayor parte de la alimentación de la Humanidad, mientras que la celulosa no es asimilable en absoluto. Tras laboriosas investigaciones, los químicos llegaron a la conclusión de que la diferencia en el tipo de condensación es del modo siguiente: supongamos una molécula de glucosa vista de lado (en cuyo caso se la simbolizará por «u») o vista de arriba abajo (simbolizándola en tal caso por «n»), La molécula de almidón puede entonces considerarse que está formada por una serie de moléculas de glucosa dispuestas de la siguiente manera «...uuuuuuuuu...», mientras que la celulosa consiste en «...unununununun...». Los jugos digestivos del organismo poseen la capacidad de hidrolizar el enlace «uu» del almidón, liberando a partir de él la glucosa, que luego puede ser absorbida para obtener energía. Aquellos mismos jugos no pueden en cambio romper el enlace «un» de la celulosa, y toda la celulosa que ingerimos pasa a través del tubo digestivo y es seguidamente excretada.

Existen ciertos microorganismos que pueden digerir la celulosa, pero no lo puede conseguir ninguno de los animales superiores. Algunos de estos microorganismos viven en el tubo digestivo de los rumiantes y termitas, por ejemplo. Gracias a estos pequeños ayudantes, las vacas pueden vivir de la hierba y las termitas de la madera. Los microorganismos forman, a partir de la celulosa, glucosa en cantidad, y luego utilizan la que precisan, mientras que el huésped usa el sobrante. Los microorganismos proporcionan el alimento elaborado, en tanto que el huésped aporta las materias primas y el lugar donde vivir. Esta forma de cooperación entre dos formas de vida para un beneficio mutuo se denomina «simbiosis», a partir de las palabras griegas que significan «vivir juntos».

Cristóbal Colón descubrió que los nativos sudamericanos jugaban con pelotas formadas por un jugo vegetal endurecido. Colón, y otros exploradores que visitaron la América del Sur en los dos siglos siguientes, quedaron fascinados por estas pelotas que botaban (obtenidas del jugo de ciertos árboles, en el Brasil). Muestras de ellas fueron llevadas a Europa posteriormente, como una curiosidad. Hacia el año 1770, Joseph Priestley (poco antes de descubrir el oxígeno) halló que una masa de este material podía borrar las marcas de lápiz. Los ingleses la llaman «goma de la India» debido a que procede de las «Indias» (el nombre original del nuevo mundo descubierto por Colón).

Con el tiempo, la gente halló otros usos para la goma. En 1823, un escocés llamado Charles Macintosh patentó vestiduras constituidas por una capa de goma entre dos capas de tejido, consiguiendo una impermeabilización, y por ello tales prendas aún son denominadas algunas veces «mackintoshes» (con una «k» añadida).

Sin embargo, la dificultad que planteaba la goma al ser utilizada de esta manera era que con el calor se volvía pegajosa y gomosa, mientras que cuando el tiempo era frío se volvía correosa y dura.

Algunos individuos intentaron descubrir formas de tratar la goma, al objeto de suprimir estas características indeseables. Entre ellos se encontraba un norteamericano llamado Charles Goodyear, quien apenas tenía conocimientos químicos, pero que trabajó siguiendo el método del ensayo y el error. Un día, en 1839, accidentalmente vertió una mezcla de goma y azufre sobre una estufa caliente. Intentó rascarla rápidamente y descubrió sorprendido que la mezcla de goma-azufre calentada aparecía seca, incluso cuando aún estaba caliente. La calentó y enfrió repetidamente, y halló al fin que tenía una muestra de goma que no se volvía pegajosa con el calor, o similar al cuero con el frío, sino que seguía siendo suave y elástica.

Este proceso de añadir azufre a la goma se denomina ahora «vulcanización» (de Vulcano, el dios romano del fuego). El descubrimiento de Goodyear estableció las bases de la industria del caucho. Se afirma que el propio Goodyear nunca recibió recompensa alguna, a pesar de que este descubrimiento representó muchos millones de dólares. Malgastó su vida luchando por derechos de patente, y murió en una profunda miseria.

El conocimiento de la estructura molecular de la goma se remonta al año 1879, cuando un químico francés, Gustave Bouchardat, calentó goma en ausencia de aire y obtuvo un líquido llamado «isopreno». Su molécula está compuesta de cinco átomos de carbono y ocho átomos de hidrógeno, dispuestos de la siguiente manera:

$$
\begin{array}{c}
\qquad\; CH_3 \\
\qquad\;\, | \\
CH_2 = C - CH = CH_2
\end{array}
$$

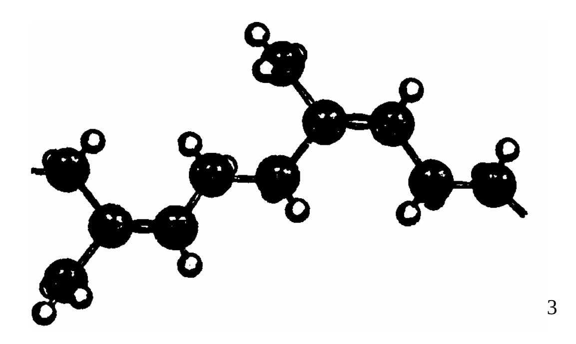
Un segundo tipo de jugo vegetal (el «látex»), obtenido a partir de ciertos árboles, en el sudeste asiático, produce una sustancia llamada «gutapercha». Carece de la elasticidad de la goma, pero cuando se calienta en ausencia de aire también produce isopreno. Tanto la goma como la gutapercha están constituidas por miles de unidades de isopreno. Como en el caso del almidón y la celulosa, la diferencia entre ellas radica en el tipo de unión. En la goma, las unidades de isopreno se hallan unidas en la forma «...uuuuu...» y de tal modo que forman espirales, que pueden ser distendidas cuando se fracciona sobre ellas, permitiendo así su elongación. En la gutapercha, las unidades se unen en la forma «... ununu..,», y forman cadenas que son más rectas y, por tanto, menos elongables.

Una simple molécula de azúcar, tal como la glucosa, es un «monosacárido» (de la palabra griega para «un azúcar»); la sacarosa y la lactosa son «disacáridos» («dos azúcares»); y el almidón y la celulosa son «polisacáridos» («muchos azúcares»). Debido a que dos moléculas de isopreno se unen para formar un tipo bien conocido de compuesto llamado «terpeno» (obtenido a partir de la esencia de trementina), la goma y la gutapercha se denominan «politerpenos».

El término general para tales compuestos fue inventado por Berzelius (un gran inventor de nombres y símbolos) ya en el año 1830. Denominó a la unidad básica un «monómero» («una parte») y a la molécula grande un «polímero» («muchas partes»). Los polímeros que consisten de muchas unidades (digamos, más de un centenar) se denominan ahora «polímeros altos» El almidón, la celulosa, la goma y la gutapercha son todos ellos ejemplos de polímeros altos.

Los polímeros no son compuestos bien definidos, sino mezclas complejas de moléculas de diferente tamaño. El peso molecular medio puede ser determinado por diversos métodos. Uno de ellos es la determinación de la «viscosidad», (la facilidad o dificultad con que un líquido fluye bajo una presión dada). Cuanto más grande y más alargada es la molécula, tanto más contribuye a la «fricción interna» de un líquido y tanto más se asemejará a la melaza cuando se vierta y menos al agua. El químico alemán Hermann Staudinger elaboró este método en 1930 como parte de su trabajo general sobre polímeros, y, en 1953, fue galardonado con el premio Nobel de Química por su contribución al conocimiento de estas moléculas gigantes.

En 1913, dos químicos japoneses descubrieron que las fibras naturales, tales como las de la celulosa, difractaban los rayos X del mismo modo como lo hace un cristal.
Las fibras no son cristales en el sentido ordinario de la palabra, pero son de carácter «microcristalino» Es decir, las cadenas largas de unidades que constituyen su molécula tienden a correr en haces paralelos en distancias más largas o más cortas, aquí y allá. A lo largo de aquellos haces paralelos, los átomos se hallan dispuestos en un orden repetitivo, del mismo modo como lo están en los cristales, y los rayos X que inciden sobre aquellas secciones de la fibra son difractados.
Debido a esto, los polímeros han sido divididos en dos grandes clases: cristalinos y amorfos.


[3]

En un polímero cristalino, como la celulosa, la fuerza de las cadenas individuales aumenta por el hecho de que las vecinas paralelas se hallan unidas entre sí por enlaces químicos. La fibra resultante tiene una considerable resistencia a la tracción. El almidón también es cristalino, pero considerablemente menos de lo que lo es la celulosa. Por ello, carece de la resistencia de la celulosa o de su capacidad para formar fibras.
La goma es un polímero amorfo. Ya que las cadenas individuales no se alinean, no se producen uniones transversales. Si se calienta; las diversas cadenas pueden quedar independientes y deslizarse libremente sobre y en torno a otras. En consecuencia, la goma, o un polímero similar a la goma, se ablandará y se volverá pegajosa y eventualmente se fundirá con el calor. (La distensión de la goma hace más rectilíneas las cadenas y le confiere un cierto carácter microcristalino. Por ello, la goma distendida tiene una considerable resistencia a la tracción.) La celulosa, y el almidón, en los cuales las moléculas individuales se hallan unidas entre sí aquí y allá, no pueden mostrar la misma independencia de vibración, de tal modo que no se ablandan con el calor.
Permanecen rígidas hasta que la temperatura es lo suficientemente alta como para inducir vibraciones que rompen la molécula de tal modo que se producen una carbonización y la emisión de humo.
A temperaturas por debajo del estado gomoso, pegajoso, los polímeros amorfos a menudo son blandos y elásticos. Sin embargo, a temperaturas aún más bajas se endurecen y adquieren el carácter de cuero o incluso el de vidrio. La goma en bruto está seca y es elástica en un campo de temperaturas más bien estrecho. La adición de azufre, en la proporción del 5 al 8 %, aporta enlaces de azufre flexibles que se extienden de una cadena a otra, lo que reduce la independencia de las cadenas y así impide que adquiera un carácter gomoso a una temperatura moderada. También aumenta la libertad de juego de las cadenas a temperaturas moderadamente bajas; por tanto, la goma no se endurecerá. La adición de cantidades mayores de azufre, hasta del 30 al 50 %, unirá las cadenas tan íntimamente que la goma se endurecerá. Se la conoce entonces como «goma dura» o «ebonita».
(Incluso el caucho vulcanizado se volverá vítreo, si se reduce la temperatura lo suficiente. Una pelota ordinaria de goma, introducida en aire líquido por unos instantes, se romperá si se lanza contra una pared. Ésta es una de las demostraciones favoritas en los cursos de introducción a la química.)

---

[3] La molécula de gutapercha, una porción de la cual se muestra aquí, está formada por miles de unidades de isopreno. Los primeros cinco álamos de carbono en la izquierda (esferas negras) y los ocho álamos de hidrógeno unidos a ellos forman fina unidad de isopreno.

Diversos polímeros amorfos muestran diferentes propiedades físicas a una temperatura dada. A la temperatura ambiente, la goma natural es elástica, diversas resinas son vítreas y sólidas, y el chicle (del níspero sudamericano) es blando y gomoso (es el principal ingrediente de la goma de mascar).

Aparte nuestros alimentos, que están principalmente constituidos por polímeros altos (carne, almidón, etc.), probablemente el polímero del que más depende el ser humano es la celulosa. Es el principal componente de la madera, material indispensable como combustible y muy útil en la construcción. La celulosa de la madera también se utiliza para fabricar papel. En las formas fibrosas puras del algodón y del lino, la celulosa ha sido el material textil más importante para el hombre, y, naturalmente, los químicos orgánicos de la mitad del siglo XIX recurrieron a la celulosa como materia prima para la elaboración de otras moléculas gigantes.

Una forma de modificar la celulosa es unir a ella el «grupo nitrato» de átomos (un átomo de nitrógeno y tres átomos de oxígeno) a las combinaciones-hidrógeno («grupos hidróxilos») en las unidades de glucosa. Cuando se hizo esto, tratando la celulosa con una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico, se creó un explosivo de poder sin paralelo hasta entonces. El explosivo fue descubierto por accidente en 1846 por el químico sueco de origen alemán llamado Christian Friedrich Schönbein (quien, en 1839, había descubierto el ozono). Había derramado una mezcla de ácido en la cocina (donde le estaba prohibido experimentar, haciéndolo por tanto en ausencia de su mujer) y, según cuenta la historia, cogió el delantal de algodón de su esposa, al objeto de limpiar el líquido derramado. Cuando colgó el delantal sobre el fuego para secarlo, se encendió sin dejar rastro de él.

Schönbein reconoció instantáneamente las posibilidades de su descubrimiento denominado «nitrocelulosa». Schönbein vendió la fórmula a varios Gobiernos. La pólvora ordinaria producía tantos humos que ennegrecía el ánima de los cañones, que debían ser limpiados entre uno y otro disparo, y también daba lugar a tal cantidad de humo que, después de las primeras andanadas, las batallas tenían que librarse a ciegas. Por tanto, los Ministerios de Guerra se sintieron muy bien dispuestos ante la posibilidad de utilizar un explosivo que no sólo era más poderoso, sino que además, no producía humos. Las fábricas para la manufactura del algodón pólvora comenzaron a crecer, y desaparecieron casi tan rápidamente como habían nacido. El algodón pólvora era un explosivo demasiado peligroso; no esperaba a ser disparado. A principios de 1860, se había superado el *boom* del algodón pólvora, tanto de forma figurada como literalmente.

Sin embargo, más tarde se descubrieron nuevos métodos para eliminar las pequeñas cantidades de impurezas que favorecían la explosión del algodón pólvora. Entonces se hizo razonablemente seguro para ser manipulado. El químico inglés Dewar (famoso por el gas licuado) y su colaborador Frederick Augustus Abel, introdujeron la técnica, en 1889, de mezclarlo con la nitroglicerina y añadir vaselina a la mezcla para hacerla moldeable en cables (la mezcla fue llamada «cordita»). Lo que finalmente se obtuvo fue un polvo que no producía humos y era útil. La guerra de Cuba, de 1898, fue la última de cierta importancia en la que se utilizó la pólvora común.

(La Era de la máquina añadía también su aportación a los horrores de los armamentos. Hacia 1860, el inventor estadounidense Richard Gatling produjo la primera «ametralladora» para el disparo rápido de balas, y ésta fue mejorada por otro inventor del mismo país, Hiram Stevens Maxim, en 1880. El «arma de Gatling» dio origen al vocablo inglés *gat* para designar el arma. Ésta y su descendiente, la «Maxim», proporcionaron a los imperialistas desvergonzados de finales del siglo XIX una ventaja sin precedentes sobre las «razas inferiores», para utilizar la ofensiva frase de Rudyard Kipling, de África y Asia. Una canción popular dice: «¡Sea lo que sea, hemos llevado el "Maxim", y ellos no lo tienen!»)

Los «progresos» de este tipo continuaron en el siglo xx. El explosivo más importante en la Primera Guerra Mundial fue el «trinitrotolueno», abreviado familiarmente como TNT. En la Segunda Guerra Mundial se utilizó un explosivo aún más

poderoso, la «ciclonita». Ambos contienen el grupo nitro (NO_2) en vez del grupo nitrato (NO_2O). Sin embargo, todos los explosivos químicos tuvieron que ceder el trono a las bombas nucleares en 1945 (véase capítulo IX).

La nitroglicerina, a su vez, fue descubierta en el mismo año que el algodón pólvora. Un químico italiano llamado Ascanio Sobrero trató la glicerina con una mezcla de ácido nítrico y ácido sulfúrico y supo que había descubierto algo importante cuando casi se mató a consecuencia de la explosión que le siguió. Sobrero, careciendo de los impulsos emocionales de Schönbein, consideró que la nitroglicerina era una sustancia demasiado peligrosa para ser manejada y apenas informó sobre ella. Pero, antes de que hubieran transcurrido 10 años, una familia sueca, los Nobel, la fabricaron como un «aceite explosivo», para utilizarlo en minería y en trabajos de construcción. Después de una serie de accidentes, incluyendo aquel que costó la vida a un miembro de la familia, el hermano de la víctima, Alfred Bernhard Nobel, descubrió un método para mezclar la nitroglicerina con una tierra comúnmente llamada *kieselguhr*, o «tierra de diatomeas» (el *kieselguhr* consta, sobre todo, de los delicados esqueletos de los organismos unicelulares llamados diatomeas). La mezcla consistía en tres partes de nitroglicerina y una de *kieselguhr*, pero era tal el poder absorbente de este último, que la mezcla era virtualmente un polvo seco. Una barrita de esta tierra (dinamita) impregnada podía ser dejada caer, percutida, incluso consumida por el fuego, sin explotar. Cuando se sometía a la acción de un percutor (accionado eléctricamente y a distancia), manifestaba todo el poder de la nitroglicerina pura.

Los percutores contenían explosivos sensibles que detonaban por el calor o por un golpe metálico y, por ello, se denominan «detonadores». La fuerte percusión de la detonación desencadena la de la dinamita, menos sensible. Parecía como si el peligro simplemente se trasladara desde la nitroglicerina a los detonadores, pero en realidad aquello no era tan malo como pueda parecer, ya que el detonador sólo se requiere en pequeñas cantidades. Los detonadores más utilizados son el fulminato de mercurio ($C_2N_2O_2Hg$) y la ácida de plomo (N_6Pb).

Los cartuchos de «dinamita» hicieron posible proveer al Oeste americano de raíles, minas, carreteras y diques, a una velocidad sin precedentes en la Historia. La dinamita, y otros explosivos que también descubrió, hicieron millonario al aislado e impopular Nobel (que fue calificado, a pesar de sus actividades humanitarias, de «mercader de la muerte»). Cuando murió en 1896, legó un donativo del que derivaban los famosos premios Nobel, cada uno de los cuales asciende a la cifra de 40.000 dólares, que debían ser concedidos cada año en cinco campos distintos: Química, Física, Medicina y Fisiología, Literatura y paz.

Los primeros premios fueron otorgados el 10 de diciembre de 1901, en el quinto aniversario de su muerte, y con el tiempo se ha convertido en el mayor honor que cualquier científico puede recibir. (Es lamentable que Nobel no pensara en la Astronomía y las ciencias de la Tierra, de forma que hombres tales como Shapley, Hubble y otros hubieran podido ser recompensados apropiadamente por su labor.)

Considerando la naturaleza de la raza humana, los explosivos continuaron formando una fracción mensurable de la actividad de los grandes científicos. Ya que, casi todos los explosivos contienen nitrógeno, la química de este elemento y sus compuestos era de importancia clave. (También es, debemos admitir, de importancia clave para la vida.)

El químico alemán Wilhelm Ostwald, que estaba interesado en la teoría química más que en los explosivos, estudió la velocidad a la que se producían las reacciones químicas. Aplicó a la química los principios matemáticos asociados a la Física, siendo así uno de los fundadores de la «Química-Física». A finales del pasado siglo y comienzos de éste, elaboró métodos para convertir el amoníaco (NH_3) en óxidos de nitrógeno, que luego pudieron ser utilizados para la fabricación de explosivos. Por su labor teórica, particularmente sobre la catálisis, Ostwald recibió el premio Nobel de Química en 1909..

La última fuente de origen del nitrógeno utilizable era, en las primeras décadas del siglo xx, los depósitos de nitrato en el desierto del Noreste de Chile. Durante la Primera Guerra Mundial, estas regiones dejaron de ser alcanzables por los alemanes, por la intervención de la Marina inglesa. Sin embargo, el químico alemán Fritz Haber había ideado un método por el que el nitrógeno molecular del aire podía combinarse con el hidrógeno bajo presión, para formar el amoníaco necesario para el proceso de Ostwald. Este «proceso Haber» fue mejorado por el químico alemán Karl Bosch, quien supervisó la creación de industrias, durante la Primera Guerra Mundial, para la fabricación del amoníaco. Haber recibió el premio Nobel de Química en 1918, y Bosch lo compartió en 1931 (con Bergius).
Pero volvamos a la celulosa modificada. Claramente era la adición del grupo nitrato lo que la convertía en explosiva. En el algodón pólvora estaban nitrados todos los grupos hidróxilos disponibles. ¿Qué pasaría si sólo lo estuvieran algunos de ellos? ¿No serían menos explosivos?
En realidad, esta celulosa parcialmente nitrada no era en absoluto explosiva. Sin embargo, era consumida con rapidez por el fuego; el material fue denominado «piroxilina» (de las palabras griegas que significan «madera ígnea»).
La piroxilina podía ser disuelta en mezclas de alcohol y éter. (Esto fue descubierto, independientemente, por el estudiante francés Louis-Nicolas Ménard y un estudiante norteamericano de Medicina llamado J. Parkers Maynard. Se advierte una curiosa semejanza entre sus apellidos.) Cuando se evaporaban el alcohol y el éter, la piroxilina aparecía depositada en la forma de una película tenue y transparente, a la que se llamó «colodión». Su primera aplicación fue en forma de revestimiento sobre cortes de pequeña importancia y quemaduras; fue denominado «piel nueva». Sin embargo, las aventuras de la piroxilina sólo estaban comenzando. Todavía debían acontecer muchas más.
La propia piroxilina es quebradiza en cantidad. El químico inglés Alexander Parkes descubrió que, si se disolvía en alcohol y éter se mezclaba con una sustancia tal como el alcanfor, por la evaporación del disolvente se formaba un sólido duro que se ablandaba y se hacía maleable al calentarse. Podía luego ser moldeado en cualquier forma deseada, forma que conservaba al enfriarse y endurecerse. Así, la nitrocelulosa se transformó en el primer «plástico artificial», y esto sucedió en el año 1865. El alcanfor, que introducía las propiedades plásticas en una sustancia por lo demás quebradiza, fue el primer «plastificante».
Lo que determinó que los plásticos llamaran la atención del público y lo convirtieran en algo más que una curiosidad química fue su espectacular presentación en la sala de billar. Las bolas de billar se fabricaban entonces de marfil, material que podía obtenerse del cadáver de un elefante. Naturalmente, esto creaba problemas. En los comienzos de 1860 se ofreció un premio de 10.000 dólares para el mejor sustituto del marfil que pudiera satisfacer las múltiples propiedades de una bola de billar, relativas a su dureza, elasticidad, resistencia al calor y a la humedad, ausencia de grano, etc. El inventor estadounidense John Wesley Hyatt fue uno de los que optó al premio. No logró ningún resultado positivo hasta que tuvo noticias acerca del truco de Parkes de plastificar la piroxilina para convertirla en material moldeable, que podía transformarse en un sólido duro. Hyatt desarrolló métodos mejorados de fabricación del material, empleando menor cantidad de alcohol y éter (productos caros) y poniendo mayor atención en las condiciones de calor y presión utilizadas. Hacia 1869, Hyatt fabricaba baratas bolas de billar de este material, que él llamó «celuloide». Ganó el premio.
El celuloide resultó tener también importancia fuera de la mesa de billar. Era realmente versátil. Podía ser moldeado a la temperatura de ebullición del agua, podía ser cortado, torneado, serrado a temperaturas bajas, era fuerte y duro en bloque, pero podía ser producido en la forma de películas delgadas y flexibles que servían como collares, sonajeros para niños, etc. En la forma de una película aún más delgada y flexible podía ser utilizado como base para los compuestos de plata en gelatina y, de este modo, se convirtió en el primer filme fotográfico práctico.

El único defecto del celuloide era que, gracias a sus grupos nitrato, tenía la tendencia a quemarse con sorprendente rapidez, sobre todo cuando se hallaba en la forma de película fina. Por tal motivo fue la causa de una serie de tragedias.
La sustitución por grupos acetato (CH_3COO-) de los grupos nitrato dio lugar a la formación de otro tipo de celulosa modificada, llamada «acetato de celulosa» Adecuadamente plastificada, tiene propiedades tan buenas, o casi tan buenas, como las del celuloide, y además la ventaja de que se quema con mucha menor facilidad. El acetato de celulosa empezó a utilizarse inmediatamente antes de la Primera Guerra Mundial, y, después de la guerra, remplazó completamente al celuloide en la fabricación de películas fotográficas y muchos otros objetos.
En el curso de medio siglo después del desarrollo del celuloide, los químicos se emanciparon en la dependencia a la celulosa como base de los plásticos. Ya en el año 1872, Baeyer (que más tarde sintetizaría el índigo) había indicado que cuando se calentaban conjuntamente los fenoles y aldehídos se obtenía como resultado una masa resinosa. Ya que estaba interesado sólo en las pequeñas moléculas que podía aislar de la reacción, ignoró esta masa en el fondo del recipiente (como típicamente hacían los químicos orgánicos del siglo XIX cuando los precipitados ensuciaban sus recipientes de vidrio). Treinta y siete años más tarde, el químico americano de origen belga Leo Hendrik Baekeland, experimentando con el formaldehído, halló que, en ciertas condiciones, la reacción podía dar lugar a una resina que, al seguir siendo calentada bajo presión, se convertía primero en un sólido blando, y luego en una sustancia dura e insoluble. Esta resina podía ser moldeada mientras era blanda y luego dejar que se endureciera y adoptara una forma permanente. O, una vez dura, podía ser transformada en polvo, vertida en un molde y transformada en una pieza de forma determinada bajo la acción del calor y la presión. Podían moldearse formas muy complejas con facilidad y rapidez. Además, el producto era inerte e inalterable por la mayoría de los agentes ambientales.
Baekeland denominó a su producto baquelita, inspirándose en su propio nombre. La baquelita pertenece a la clase de los plásticos «termoestables» que, una vez se han enfriado, no pueden ablandarse de nuevo mediante el calor (aunque, por supuesto, pueden ser destruidos por el calor intenso). Materiales tales como los derivados de la celulosa, que pueden ser convertidos reiteradas veces en materiales blandos, son llamados «termoplásticos» La baquelita tiene numerosos usos: como aislante, adhesivo, agente laminante, etc. Aún cuando es el más antiguo de los plásticos termoestables, sigue siendo el más utilizado.
La baquelita fue el primer polímero alto de utilidad producido en el laboratorio a partir de moléculas pequeñas. Por vez primera, el químico había logrado alcanzar completamente este particular objetivo perseguido. Por supuesto, no representa una síntesis en el sentido de la síntesis de la heme o la quinina, donde los químicos deben colocar hasta el último átomo en la posición apropiada, casi uno cada vez. En cambio, la producción de polímeros altos requiere simplemente que las unidades pequeñas, de las que está compuesto, se mezclen bajo las condiciones apropiadas. Entonces se pone en marcha una reacción en la que las unidades forman automáticamente una cadena, sin la intervención específica, punto a punto, del químico. Sin embargo, el químico puede alterar indirectamente la naturaleza de la cadena al variar los materiales de partida o las proporciones entre ellos o por la adición de pequeñas cantidades de ácidos, álcalis o diversas sustancias que actúan como «catalizadores» y tienden a guiar la naturaleza precisa de la reacción.
Naturalmente, con el éxito de la baquelita, los químicos recurrieron a otros posibles materiales de partida, en su búsqueda de más polímeros altos sintéticos, que pudieran ser plásticos de utilidad. Y, con el transcurrir del tiempo, obtuvieron reiteradas veces satisfactorios resultados.
Por ejemplo, los químicos británicos descubrieron en la década de 1930 que el gas etileno *(CH_2=CH_2)*, bajo la acción del calor y la temperatura, podía formar cadenas muy largas. Uno de los dos enlaces, en el doble enlace entre los átomos de carbono, se abre y

se une a una molécula próxima. Cuando esto ocurre una y otra vez, se produce una molécula de cadena larga llamada «polietileno».

La molécula de cera-parafina es una cadena larga constituida por las mismas unidades, pero la molécula del polietileno aún es más larga. Así, pues, el polietileno es por ello similar a la cera, pero sus propiedades son aún más notables. Tiene la blancura nebulosa de la cera, es suave al tacto, posee las propiedades aislantes eléctricas, el ser impermeables al agua, y la ligereza (puede decirse que es el único plástico que flota en el agua). Sin embargo, tiene la ventaja de ser mucho más resistente y flexible que la parafina.

Cuando se fabricó por primera vez, el polietileno requería presiones peligrosas, y el producto tenía un punto de fusión más bien bajo: exactamente, por encima del punto de ebullición del agua. Se ablandaba hasta ser inutilizable a temperaturas por debajo del punto de ebullición. Aparentemente, esto era debido al hecho de que la cadena de carbono tenía ramas que impedían que las moléculas se dispusieran íntimamente próximas entre sí, adoptando una estructura cristalina. En 1953, un químico alemán llamado Karl Ziegler halló una forma para producir cadenas de polietileno no ramificadas, y sin la necesidad de presiones elevadas. El resultado fue una nueva variedad de polietileno, más resistente y fuerte que el antiguo y capaz de resistir las temperaturas de ebullición del agua sin ablandarse demasiado. Ziegler logró esto utilizando un nuevo tipo de catalizador, una resina con iones de metales tales como el aluminio y el titanio unidos a grupos cargados negativamente a lo largo de la cadena.

Al tener noticia sobre el desarrollo por Ziegler de catalizadores órgano-metálicos para la formación de polímeros, el químico italiano Giulio Natta comenzó a aplicar la técnica al propileno (etileno al que se unió un pequeño grupo metílico de un solo átomo de carbono, el CH_3—). En el curso de 10 semanas, halló que en el polímero resultante todos los grupos metílicos mostraban la misma dirección, aunque (como era usual en la formación de polímeros antes de aquel tiempo) dirigido al azar, en cualquier dirección. Tales «polímeros isotácticos» (el nombre fue propuesto por la signora Natta) resultaron tener útiles propiedades, y éstos pueden ahora ser fabricados virtualmente a voluntad. En otras palabras, los químicos pueden idear polímeros con mayor precisión de lo que hasta ahora han solido hacer. Por su labor en este campo, Ziegler y Natta compartieron el premio Nobel de Química de 1963.

El proyecto de la bomba atómica contribuyó aportando otro polímero alto de utilidad, en la forma de un pariente singular del polietileno. En la separación del uranio 235 del uranio natural, los físicos nucleares tenían que combinar el uranio con el flúor en el compuesto gaseoso hexafloruro de uranio. El flúor es la más activa de todas las sustancias y ataca casi cualquier cosa. Intentando hallar lubricantes y sustancias para cerrar sus recipientes, al objeto de que fueran inatacables por el flúor, los físicos recurrieron a los «fluorocarbonos», sustancias en las que el carbono se hallaba combinado con el flúor (que remplaza al hidrógeno).

Hasta entonces, los fluorocarbonos habían sido sólo curiosidades de laboratorio. La primera y más simple de este tipo de moléculas, el «tetrafluoruro de carbono» (F_4C), había sido obtenida en forma pura en 1926. La química de estas sustancias fue estudiada intensamente. Entre los fluorocarbonos estudiados se hallaba el «tetrafluoruro etileno» *(F_2C=F_2C)*, que había sido sintetizado por vez primera en 1933 y que es, como se puede ver, etileno con sus 4 «hidrógenos» remplazados por 4 átomos de flúor. Alguien debió pensar que el tetrafluoruro etileno podía polimerizarse como el etileno. Después de la guerra, los químicos de la «Du Pond» produjeron un polímero de cadena larga cuya estructura, $F_2CF_2CF_2C$, era tan monótona como la del polietileno, $H_2CH_2CH_2C$... Su nombre comercial es «Teflón» (el radical «tefl» proviene de una abreviatura de la palabra «tetrafluoro»).

El «Teflón» es similar al polietileno. Los enlaces de carbono-flúor son más fuertes que los de carbono e hidrógeno y ofrecen menos oportunidad de interferencia del medio ambiente. El «Teflón» es insoluble en todo, no se moja con nada, es un aislante eléctrico

extremadamente bueno y mucho más resistente al calor que incluso el nuevo y mejorado polietileno. La aplicación conocida del «Teflón», por lo que se refiere a los usos que de él puede hacer el ama de casa, es un revestimiento de las sartenes, que permite que los alimentos sean fritos sin grasa, ya que la grasa no se pega al polímero de fluorocarbonado que la repele.
Un compuesto interesante que no es exactamente un fluorocarbono es el «Freón» (F_2CL_2C), introducido en 1932 como refrigerante. Es más caro que el amoníaco o el dióxido de azufre utilizados en los congeladores a gran escala, pero, por otra parte, el «Freón» es inodoro, atóxico e ininflamable, de tal modo que cualquier fuga accidental representa un peligro mínimo. Gracias al «Freón», los acondicionadores de aire en las habitaciones se han convertido en algo muy característico de la escena norteamericana desde la Segunda Guerra Mundial.
Por supuesto, las propiedades plásticas no pertenecen sólo al mundo orgánico. Una de las más antiguas de todas las sustancias plásticas es el vidrio. Las grandes moléculas del vidrio son esencialmente cadenas de átomos de sílice y oxígeno; es decir, —Si—O—Si—O—Si—O—Si—, y así indefinidamente. Cada átomo de sílice en la cadena tiene dos enlaces no ocupados, a los que pueden añadirse otros grupos. El átomo de sílice, de forma similar al átomo de carbono, tiene 4 enlaces de valencia. Sin embargo, el enlace sílice-sílice es más débil que el enlace carbono-carbono, de tal modo que sólo se forman cadenas cortas de sílice, y aquéllas (en los compuestos llamados «silanos») son inestables.
Sin embargo, el enlace sílice-oxígeno es muy fuerte y en tales cadenas aún son más estables que aquéllas del carbono. En realidad, puesto que la corteza de la Tierra es la mitad oxígeno y una cuarta parte de sílice, la base sólida sobre la que nos hallamos puede considerarse esencialmente como una cadena de sílice-oxígeno.
Aunque la belleza y utilidad del vidrio (un tipo de arena que se ha hecho transparente) son infinitas, posee la gran desventaja de romperse, y, en el proceso de rotura, produce fragmentos duros y cortantes, que pueden ser peligrosos e incluso mortales. Un parabrisas de automóvil, por efecto de un golpe, puede convertirse en una granada de metralla.
No obstante, el vidrio puede ser preparado como una lámina doble entre las que se coloca una delgada capa de un polímero transparente, que se endurece y actúa como un adhesivo. Éste es el «vidrio de seguridad», pues, cuando es roto, e incluso se lo intenta pulverizar, cada pieza es mantenida firmemente en su lugar por el polímero. Ninguno vuela en misiones mortales. Originalmente, ya en el año 1905, se utilizó el colodión como adhesivo, pero luego ha sido remplazado en su mayor parte por polímeros constituidos por moléculas pequeñas, tales como el cloruro de vinilo. (El cloruro de vinilo es similar al etileno, salvo por el hecho de que los átomos del hidrógeno están remplazados por un átomo de cloro.) La «resina vinícola» no es decolorada por la luz, de tal modo que puede confiarse que el vidrio de seguridad no adquirirá un tinte amarillento con el transcurso del tiempo.
Luego existen los plásticos transparentes que pueden remplazar completamente al vidrio, al menos en algunas aplicaciones. Hacia 1935, «Du Pont» polimerizó una pequeña molécula llamada metil metacrilato y moldeó el polímero resultante (un «plástico poliacrílico») en láminas claras y transparentes. Los nombres comerciales de estos productos son «Plexiglás» y «Lucita». Tal «vidrio orgánico» es más ligero que el vidrio ordinario, más fácilmente moldeado, menos quebradizo y, simplemente, al romperse se agrieta en vez de saltar en astillas. Durante la Segunda Guerra Mundial, las láminas plásticas transparentes modeladas adquirieron una importante aplicación como ventanas y cúpulas transparentes en los aviones, donde tiene particular importancia la transparencia y el que no sean quebradizas. Pero los plásticos poliacrílicos tienen sus desventajas. Son afectados por los disolventes orgánicos, se ablandan más fácilmente por el calor que el vidrio y se rayan con facilidad. Los plásticos poliacrílicos utilizados en las ventanas de los automóviles, por ejemplo, se rayarían rápidamente bajo el impacto de las partículas de polvo y se volverían peligrosamente nebulosos. En

consecuencia, con mucha probabilidad el vidrio no podrá ser totalmente remplazado. En realidad, actualmente se está desarrollando una nueva versatilidad. Las fibras de vidrio han sido tejidas en materiales textiles que tienen todas la flexibilidad de las fibras orgánicas, y la inestimable ventaja adicional de ser totalmente incombustibles.

Además de los sustitutivos del vidrio, existe lo que puede llamarse un compromiso de vidrio. Como he dicho, cada átomo de sílice en una cadena de sílice-oxígeno tiene dos enlaces disponibles para unirse a otros átomos. En el vidrio aquellos otros átomos son átomos de oxígeno, pero no precisan serlo. ¿Qué ocurriría si se unieran grupos que contienen carbono en vez de oxígeno? Se tendría entonces una cadena inorgánica con cadenas laterales orgánicas.

Así, pues, puede decirse que se trata de un compromiso entre un material orgánico y otro inorgánico. Ya en el año 1908, el químico Inglés Frederic Stanley Kipping formó tales compuestos, y ahora se los conoce como «siliconas».

Durante la Segunda Guerra Mundial, las «resinas de silicona» de larga cadena adquirieron gran importancia. Tales siliconas son esencialmente más resistentes al calor que los polímeros orgánicos por completo. Al variar la longitud de la cadena y la naturaleza de las cadenas laterales, puede obtenerse una serie de propiedades deseables no poseídas por el propio vidrio. Por ejemplo, algunas siliconas son líquidas a la temperatura ambiente y cambian muy poco en su viscosidad en un amplio campo de valores de temperatura. (Es decir, no se licuan con el calor o aumentan de viscosidad con el frío.) Ésta es una propiedad particularmente útil para el fluido hidráulico, el tipo de fluido usado, por ejemplo, para bajar el tren de aterrizaje de los aviones. Otras siliconas forman sustancias de cierre blandas, como si fueran de masilla, que no se endurecen o rompen a las bajas temperaturas de la estratosfera y repelen el agua. Existen otras siliconas que sirven para lubricantes resistentes a los ácidos, etc.

Hacia fines de la década de 1960 se utilizaban ya toda clase de plásticos a razón de 7.000.000 Tm por año, lo cual planteaba un serio problema respecto a la eliminación de desperdicios.

En 1962 se anunció la posible utilización de un polímero definitivamente asombroso, cuyas derivaciones potenciales teóricas eran fascinantes. Durante aquel año, el físico soviético Boris Vladimirovich Deriaguin informó que el agua, conducida por tubos muy delgados, parecía adquirir propiedades extraordinariamente peculiares. Casi todos los químicos se mostraron escépticos. Sin embargo, poco tiempo después, los investigadores estadounidenses confirmaron el hallazgo de Deriaguin. Al parecer, ocurría lo siguiente: cuando se les imponía unas condiciones restringentes, las moléculas de agua se alineaban ordenadamente y sus átomos se aproximaban unos a otros bastante más que en condiciones ordinarias. La estructura semejaba un polímero compuesto por unidades H_2O. Desde entonces se empleó la expresión «agua polimerizante».

El agua polimerizante era 1,4 veces más densa que el agua ordinaria, soportaba una temperatura de 500º C sin entrar en ebullición, y sólo se congelaba, formando un hielo vidrioso, a los –40º C. Lo más interesante para los biólogos fue la posibilidad de que ese agua polimerizante existiera en los recónditos confines de la célula interna, y que sus propiedades constituyeran la clave de algún proceso vital.

Sin embargo, los laboratorios químicos empezaron a divulgar informes en los que se advertía que ese agua polimerizante era, probablemente, un agua ordinaria que tal vez hubiera disuelto el silicato sódico de materias vítreas o se hubiese contaminado con la transpiración. En suma, el agua polimerizante era tan sólo agua impura. El peso de la evidencia pareció hacer derivar aquel asunto hacia lo negativo. Así, pues, se descartó el agua polimerizante tras su breve pero agitada vida..., no obstante, la controversia no ha dado fin todavía a la hora de escribir estas líneas.

Las Fibras

Las fibras sintéticas suponen un capítulo particularmente interesante en la historia de la síntesis orgánica.
Las primeras fibras artificiales (al igual que los primeros plásticos) fueron elaboradas a partir de la celulosa. Naturalmente, los químicos empezaron a partir del nitrato de celulosa, ya que se disponía de él en cantidades razonables, disolvió el nitrato de celulosa en una mezcla de alcohol y éter, e hizo pasar la densa solución resultante a través de pequeños orificios. Cuando la solución se dispersó, el alcohol y el éter se evaporaron, dando lugar a que el nitrato de celulosa adquiriera la forma de finos filamentos de colodión. (Ésta es, esencialmente, la forma en que las arañas y gusanos de seda forman sus hilos. A través de finos orificios expulsan un líquido que se convierte en una fibra sólida al exponerse al aire.) Las fibras de nitrato de celulosa eran demasiado inflamables para ser utilizadas, pero los grupos nitrato podían eliminarse mediante un tratamiento químico apropiado, y el resultado fue un hilo de celulosa lustroso que se asemejaba a la seda.
Por supuesto, el método de Chardonnet era caro, dado que primero debían introducirse grupos nitrato para luego ser eliminados, sin tomar en consideración el peligroso interludio mientras se hallaban en su lugar y el hecho que la mezcla de alcohol-éter utilizada como disolvente también era peligrosamente inflamable. En 1892 se descubrieron métodos para disolver la propia celulosa. El químico inglés Charles Frederick Cross, por ejemplo, la disolvió en disulfuro de carbono y formó un filamento a partir de la solución viscosa resultante (llamada «viscosa»). El problema en este caso consistía en que el disulfuro de carbono es inflamable, tóxico y de mal olor. En 1903, se inició el empleo de un método competitivo que empleaba ácido acético como parte del disolvente, y daba lugar a una sustancia llamada acetato de celulosa.

Estas fibras artificiales fueron en principio denominadas «seda artificial», pero posteriormente recibieron el nombre de «rayón», debido a que por su brillo reflejaban los rayos de la luz.
Las dos principales variedades de rayón se distinguen usualmente como «rayón viscosa» y el «rayón acetato».
La viscosa puede ser impulsada a través de una hendidura para formar una lámina delgada, flexible, impermeable al agua y transparente («celofán»), proceso este inventado por el químico francés Jacques-Edwin Brandenberger en 1908. Algunos polímeros sintéticos también pueden ser inducidos a pasar a través de una hendidura con el mismo fin. Las resinas vinílicas, por ejemplo, dan lugar a un material de revestimiento llamado «Saran».
En el año 1930 nació la primera fibra completamente sintética. Permítaseme empezar diciendo algo acerca de la seda. La seda es un producto animal elaborado por ciertos gusanos que son exigentes en cuanto se refiere a sus necesidades de comida y cuidados. La fibra debe ser tediosamente desovillada a partir de sus capullos. Por estos motivos, la seda es cara y no puede ser producida en masa.
Fue producida por vez primera en China hace mas de 2000 años, y el secreto de su preparación fue celosamente guardado por los chinos, de tal modo que pudieron crear un lucrativo monopolio para la exportación.
Sin embargo, pese a todo, los secretos no pueden ser guardados eternamente, a pesar de todas las medidas de seguridad. El secreto se extendió a Corea, Japón y la India. La antigua Roma recibía la seda a través de una larga ruta que atravesaba Asia, obteniendo cada uno de los innumerables intermediarios en dicha ruta su ganancia; de esta forma, la fibra apenas podía ser adquirida salvo por los más acaudalados. En el año 150 d. de J.C., huevos de gusano de seda fueron robados en Constantinopla, y se inició así la producción de seda en Europa. No obstante, la seda ha seguido siendo un objeto más o menos de lujo. Además, hasta hace poco no existía ningún buen sustitutivo. El rayón pudo imitar su brillo, pero no su transparencia o resistencia.

Después de la Primera Guerra Mundial, cuando las medias de seda se convirtieron en un objeto indispensable del guardarropa femenino, se hizo muy fuerte la presión para la obtención de mayores cantidades de seda o de algún adecuado sustitutivo de la misma. Esto ocurrió particularmente en los Estados Unidos, donde la seda era utilizada en grandes cantidades y donde las relaciones con el principal proveedor, el Japón, estaban empeorando de forma gradual. Los químicos soñaban en el modo de obtener una fibra que pudiera compararse con ella.
La seda es una proteína. Su molécula está constituida por monómeros «aminoácidos» que, a su vez, contiene grupos «amino» (—NH_2) y «carboxilo» (—COOH). Los dos grupos se hallan unidos entre sí por un átomo de carbono; representando al grupo amino por *a* y al grupo carboxilo por c, y al carbón interpuesto por un guión, podemos escribir un aminoácido de la siguiente manera: a - c. Estos aminoácidos se polimerizan de tal modo que el grupo amino de uno se condensa con el grupo carboxilo del siguiente. Así, la estructura de la molécula de la seda es similar a ésta: ...a – c . a – c . a – c . a - c...
En los años 30, un químico de «Du Pont», llamado Wallace Hume Carothers, investigaba las moléculas que contenían grupos amino y grupos carboxilo, con la esperanza de descubrir un método para condensarlos de tal forma que dieran lugar a moléculas con grandes anillos. (Tales moléculas tienen importancia en la perfumería.) En vez de esto halló que se condensaban formando moléculas de cadena larga.
Carothers ya había sospechado que eran posibles cadenas largas y, por supuesto, el resultado no le cogió de sorpresa. Perdió poco tiempo en seguir este desarrollo. Formó fibras a partir de ácido adípico y la hexametilendiamina. La molécula de ácido adípico contiene dos grupos carboxílicos separados por cuatro átomos de carbono, de tal modo que puede simbolizarse de la siguiente manera: c - - - - c. La hexametilendiamina consiste de dos grupos amínicos separados por 6 átomos de carbono, así, pues: a - - - - - - a. Cuando Carothers mezcló las dos sustancias, se condensaron para formar un polímero similar al siguiente: ...a - - - - - - a . c - - - -c . a - - - - - - a . c - - - - c . a - - - - - - a... Los lugares en los que tiene lugar la condensación tienen la configuración c.a hallada en la seda, tal como se podrá apreciar.
Al principio, las fibras producidas no eran muy buenas. Resultaban demasiado débiles. Carothers decidió que el problema radicaba en la presencia de agua producida en el proceso de condensación. El agua provocaba una reacción de hidrólisis que impedía el que prosiguiera la polimerización. Carothers halló un método para resolver esta cuestión: logró realizar la polimerización bajo presión reducida; de tal modo que el agua se evaporaba (y se eliminaba fácilmente, dejando que se condensara sobre una superficie de vidrio enfriada mantenida en las proximidades del líquido reaccionante, e inclinada de tal modo que alejaba al agua: un «destilador molecular»).
Entonces la polimerización podía proseguir indefinidamente. Dio lugar a hermosas cadenas rectas y largas y, por último, en 1935. Carothers tenía la base para la fibra soñada.
El polímero formado a partir del ácido adípico y la heximetilendiamina fue fundido y empujado a través de orificios. Luego fue estirado hasta que las fibras estuvieron juntas formando haces cristalinos. El resultado fue un filamento brillante similar al de la ceda, que podía ser utilizado para tejer una tela tan transparente y hermosa como la seda, e incluso más fuerte. Esta primera fibra completamente sintética fue llamada «nylon» (nilón).
Carothers no consiguió vivir para ver cómo fructificaba su descubrimiento, falleció en 1937.
«Du Pont» anunció la existencia de la fibra sintética en 1938 y empezó a producirla comercialmente en 1939. Durante la Segunda Guerra Mundial, las fuerzas armadas de los Estados Unidos utilizaron la producción de nilón para los paracaídas y otros centenares de fines. Pero, después de la guerra, el nilón remplazó completamente a la seda para prendas interiores.
El nilón abrió la senda para la producción de otras muchas fibras sintéticas. El acrilonitrilo o cianuro de vinilo (CH_2 = CNCH) puede lograrse que polimerice en una cadena larga similar a

aquella del polietileno, pero con grupos cianuro (en este caso totalmente atóxicos) unidos a cada átomo de carbono. El resultado, introducido en 1950, es el «Orlón». Si el cloruro de vinilo ($CH_2 = ClCH$) se añade, de tal modo que la cadena contenga tantos átomos de cloro como grupos cianuro, se obtiene el «Dynel». O la adición de grupos acetato, utilizando el acetato de vinilo ($CH_2 = CH_3CHOOC$), da lugar al «Acrilán».
En 1941, los británicos crearon una fibra «poliéster», en la que el grupo carboxilo de un monómero se condensa con el grupo hidróxilo de otro. El resultado es la usual cadena larga de átomos de carbono, rota en este caso por la inserción periódica de un oxígeno en la cadena. Los británicos la llamaron «Terylene», pero en los Estados Unidos ha aparecido con el nombre de «Dacrón».
Estas nuevas fibras sintéticas repelen aún más el agua que las fibras naturales; resisten el vapor y no son fácilmente teñidas. No son destruidas por la polilla y otros insectos. Algunas son resistentes al arrugado y pueden utilizarse para fabricar prendas de «lavar y poner».

Gomas

Es un tanto sorprendente apreciar que el ser humano va sobre ruedas de caucho desde hace sólo un centenar de años. Durante miles de años ha viajado sobre ruedas de madera o metal. Cuando el descubrimiento de Goodyear hizo posible utilizar el caucho vulcanizado, a una serie de personas se les ocurrió que en torno a las ruedas podría colocarse caucho en vez de metal. En 1845, un ingeniero británico, Robert William Thomson, sustituyó esta idea por una mejor: patentó un dispositivo que consistía en un tubo de goma inflado, que podía adaptarse a una rueda. Hacia 1980, los «neumáticos» eran utilizados ya usualmente en las bicicletas y, en 1895, se emplearon en los carruajes tirados por caballos.
Aunque parezca chocante, el caucho, una sustancia relativamente débil y blanda, resultó ser mucho más resistente a la abrasión que la madera o el metal. Esta duración, junto con sus cualidades de absorción de los choques y la idea de un cojín de aire, proporcionó al ser humano una comodidad sin precedentes en los desplazamientos.
Al aumentar la importancia del automóvil, se incrementó astronómicamente la demanda de neumáticos de caucho. En medio siglo, la producción mundial de caucho aumentó 42 veces. Puede tenerse una idea de la cantidad de éste utilizado para los neumáticos en la actualidad, si indico que en los Estados Unidos dejan no menos de 200.000 Tm de residuos de goma sobre las autopistas cada año, a pesar de la cantidad relativamente pequeña de goma sometida a la abrasión procedente de los neumáticos de un solo automóvil.
La creciente demanda de caucho introdujo una cierta inseguridad en los aprovisionamientos con destino bélico de muchas naciones. Puesto que la guerra se mecanizaba, los Ejércitos y el armamento empezaban a moverse sobre goma, y el caucho solamente podía obtenerse en cantidades apreciables en la península malaya, muy lejana de las naciones «civilizadas», que con mayor probabilidad se verían envueltas en una guerra «civilizada». (La Península de Malaca no es el hábitat natural del árbol del caucho. El árbol fue trasplantado allí, con gran éxito, procedente del Brasil, donde han disminuido constantemente las existencias originales de caucho.) Los suministros de los Estados Unidos fueron cortados, al iniciarse su entrada en la Segunda Guerra Mundial, cuando los japoneses conquistaron Malaca. Las aprensiones norteamericanas en este sentido determinaron el hecho que el primer artículo racionado durante la guerra, incluso antes del ataque a Pearl Harbor, fueran los neumáticos de goma.
En la Primera Guerra Mundial, cuando la mecanización estaba empezando. Alemania fue perjudicada al serle intervenidos los suministros de caucho por el poder naval aliado.
Durante la Primera Guerra Mundial, existieron razones para considerar la posibilidad de fabricar un caucho sintético. El material de partida natural para tal goma sintética era el isopreno, el sillar de la goma natural. Ya en 1880, los químicos habían apreciado que al dejar reposar el isopreno, éste tendía a hacerse gomoso y, si se acidificaba, se convertía en un material similar a la

goma. El káiser Guillermo II tenía los neumáticos de su automóvil oficial hechos de tal material, como una especie de reclamo publicitario del virtuosismo químico alemán.
Sin embargo, existían dos obstáculos para utilizar el isopreno como material de partida para sintetizar la goma. Primero, la única fuente importante de isopreno era la propia goma. Segundo, cuando el isopreno se polimeriza, es más probable que lo haga de una forma totalmente al azar. La cadena de la goma posee todas las unidades de isopreno orientadas de la misma manera: — — — uuuuuuuuu — — —. La cadena de la gutapercha los tiene orientados de forma estrictamente alternada: — — — — unununununun — — — —. Sin embargo, cuando el isopreno es polimerizado en el laboratorio en condiciones ordinarias, las *us* y *enes*, se mezclan al azar, formando un material que no es ni goma ni gutapercha. Al no poseer la flexibilidad ni la elasticidad de la goma, carece de utilidad para la fabricación de neumáticos de automóvil.
Catalizadores semejantes a aquellos que Ziegler introdujo en 1953 para fabricar el polietileno hicieron posible polimerizar el isopreno en un producto casi idéntico al caucho natural, pero en aquel entonces ya se habían desarrollado muchas gomas sintéticas de utilidad, químicamente muy distintas de la goma natural.
Por supuesto, los primeros esfuerzos se concentraron en el intento de formar polímeros a partir de compuestos fácilmente disponibles y que se asemejaran al isopreno.
Por ejemplo, durante la Primera Guerra Mundial, bajo el acicate de la necesidad de caucho, Alemania hizo uso del dimetilbutadieno:

$$\begin{array}{c} CH_2 = \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} - \underset{\displaystyle CH_3}{\underset{|}{C}} = CH_2 \end{array}$$

No obstante, el dimetilbutadieno difiere del isopreno sólo en que contiene un grupo metilo (CH_3) en los dos carbonos centrales de la cadena de 4 átomos de carbono, en vez de sólo sobre uno de ellos.
El polímero formado a partir del dimetilbutadieno, llamado «goma metilada», pudo obtenerse a bajo costo y en cantidades apreciables.
Alemania produjo, aproximadamente, 2.500 Tm de ella durante la Primera Guerra Mundial. Si bien no es muy resistente a la fatiga fue, no obstante, la primera de las gomas sintéticas utilizables.
Hacia 1930, tanto Alemania como la Unión Soviética probaron nuevos procedimientos. Utilizaron como monómero el butadieno que no tenía ningún grupo metilo:

$$CH_2 = CH - CH = CH_2$$

Utilizando sodio metal como catalizador obtuvieron un polímero llamado «Buna», (de «*bu*tadieno» y *Na*, símbolo del sodio).
La goma Buna era un caucho sintético que podía ser considerado satisfactorio en caso de apuro. Fue mejorado por la adición de otros monómeros, que alternaban con el butadieno a intervalos en la cadena. La adición más satisfactoria fue el «estireno», un compuesto similar al etileno, pero con un anillo de benceno unido a uno de los átomos de carbono. Este producto fue llamado Buna S.
Sus propiedades eran muy similares a las de la goma natural y, en realidad, gracias a ella, las fuerzas armadas alemanas no sufrieron una grave carencia de goma en la Segunda Guerra Mundial. La Unión Soviética también dispuso de suministros adecuados de caucho de la misma manera. Las materias primas podían obtenerse a partir del carbón o el petróleo.
Los Estados Unidos desarrollaron tardíamente la goma sintética en cantidades comerciales, quizá debido a que antes de 1941 no existió un peligro de carencia de goma. Pero, después de Pearl Harbor, fabricaron goma sintética en cantidad. Empezaron a producir la goma Buna y otro tipo de goma sintética llamada «neopreno», obtenida a base del «cloropreno»:

$$CH_2 = C - CH = CH_2$$
$$\quad | $$
$$\quad Cl$$

Como puede verse, esta molécula se parece al isopreno, salvo por la sustitución del grupo metilo por un átomo de cloro.

Los átomos de cloro unidos a intervalos a la cadena del polímero confieren al neopreno una cierta resistencia que no posee la goma natural. Por ejemplo, es más resistente a los disolventes orgánicos tales como la gasolina: no se ablanda y esponja como lo haría la goma natural. Así, el neopreno es realmente preferible a la goma para usos tales como los tubos flexibles para la conducción de gasolina. El neopreno demostró claramente, por vez primera, que en el campo de las gomas sintéticas, como en otros muchos campos, el producto del tubo de ensayo no precisaba ser un mero sustituto del natural, sino que incluso podía perfeccionarlo.

Los polímeros amorfos sin semejanza química con la goma natural, pero con cualidades similares a las de la goma, han sido producidos ahora y ofrecen toda una constelación de propiedades deseables. Ya que realmente no son gomas, son denominados «elastómeros» (una abreviatura de «polímeros elásticos»).

El primer elastómero distinto de la goma fue descubierto en 1918. Éste era una «goma de polisulfuro»; su molécula era una cadena compuesta de pares de átomos de carbono que alternaban con grupos de cuatro átomos de azufre. La sustancia fue denominada «Thiokol», procediendo el prefijo de la palabra griega para el azufre.

El olor asociado a su preparación impidió durante largo tiempo que fuera producido comercialmente.

También se han formado elastómeros a partir de monómeros acrílicos, fluorocarbonos y siliconas. Aquí, como en casi todo campo que toca, el químico orgánico trabaja como un artista, utilizando materiales para crear nuevas formas y aventajar a la Naturaleza.

XI. LAS PROTEÍNAS

Moléculas De Importancia Crucial Para La Vida

Al iniciar sus estudios sobre la materia viva, los químicos se percataron de la existencia de un extenso grupo de sustancias que se comportaban de una manera peculiar. El calentamiento transformaba el estado de estas sustancias de líquido en sólido, en lugar de ocurrir lo contrario. La clara de huevo, una sustancia en la leche (caseína) y un componente de la sangre (globulina), se hallaban entre los compuestos que mostraban esta propiedad. En 1777, el químico francés Pierre-Joseph Macquer incluyó a todas las sustancias que coagulaban al ser calentadas en una clase especial que denominó «albúminas», por el término *albumen* dado por el naturalista romano Plinio a la clara de huevo.

Cuando los químicos del siglo XIX procedieron al análisis de las sustancias albuminoides, descubrieron que estos compuestos eran considerablemente más complejos que otras moléculas orgánicas. En 1839, el químico holandés Gerardus Johannes Mulder estableció la fórmula general $C_{40}H_{62}O_{12}N_{10}$, que supuso tenían en común las sustancias albuminoides. Consideró que los diversos compuestos albuminoides se formaban por la adición a esta fórmula básica de pequeños grupos que contenían azufre o fósforo. Mulder denominó a su fórmula general «proteína» (palabra que le sugirió el inveterado acuñador de términos Berzelius), a partir del vocablo griego que significa «de importancia primordial». Tal vez con este término quiso indicar simplemente que esta fórmula básica era de fundamental importancia para la determinación de la estructura de las sustancias albuminoides, pero los ulteriores acontecimientos demostraron que también era una palabra muy adecuada para describir a las propias sustancias. Pronto se apreció que las «proteínas», tal como en la actualidad se las denomina, eran de importancia crucial para la vida.

En el curso de la década que siguió a los trabajos de Mulder, el gran químico orgánico alemán Justus von Liebig estableció que las proteínas eran aún de mayor importancia para la vida que los hidratos de carbono o las grasas; no sólo aportaban carbono, hidrógeno y oxígeno, sino también nitrógeno, azufre y a menudo fósforo, elementos que se hallan ausentes en las grasas e hidratos de carbono.

En la época en que se efectuaron los intentos de Mulder y otros investigadores para establecer las fórmulas empíricas completas de las proteínas estaban condenados al fracaso. La molécula proteica era demasiado complicada para ser analizada por los métodos entonces conocidos. Sin embargo, ya se habían conseguido los primeros avances en otra línea de ataque, aquella que eventualmente perseguía revelar no sólo la composición, sino también la estructura de las proteínas. Los químicos habían empezado a aprender algo acerca de los sillares que las constituían.

En 1820, Henri Braconnot, que había conseguido degradar la celulosa en sus unidades de glucosa mediante el calentamiento de aquella en ácido (véase capítulo X), decidió ensayar el mismo método en la gelatina, una sustancia albuminoide. El tratamiento produjo una sustancia cristalina dulce. A pesar de las primeras sospechas de Braconnot, resultó que esta sustancia no era un azúcar, sino un compuesto que contenía nitrógeno, ya que podía obtenerse amoníaco (NH_3) a partir de ella. A las sustancias que contienen nitrógeno se les asignan convencionalmente nombre que terminan en «—ina», y ahora el compuesto aislado por Braconnot se denomina «glicina», de la palabra griega utilizada por «dulce».

Poco después, Braconnot obtuvo una sustancia cristalina blanca, por calentamiento del tejido muscular con ácido. A ésta la denominó «leucina», de la palabra griega para «blanco».

Cuando se logró establecer la fórmula estructural de la glicina y la leucina, se apreció que básicamente se parecían:

$NH_2 - CH_2 - C(=O)OH$

glicina

$(CH_3)_2CH - CH_2 - CH(NH_2) - C(=O)OH$

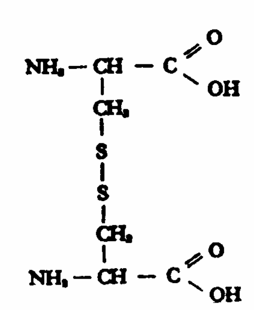
leucina

Como puede apreciarse, cada compuesto tiene en su extremo un grupo amina (NH_2) y un grupo carboxilo (COOH). Debido a que el grupo carboxilo confiere propiedades de ácido a cualquier molécula que lo contenga, las moléculas de este tipo fueron denominadas «aminoácidos». Aquellos que tienen el grupo amina y el grupo carboxilo unidos entre sí por un único átomo de carbono, como ocurre en estas moléculas, se denominan «alfa-aminoácidos».

Con el transcurso del tiempo, los químicos aislaron otros aminoácidos a partir de las proteínas. Por ejemplo, Liebig consiguió obtener uno de ellos a partir de la proteína de la leche (caseína), que denominó «tirosina» (de la palabra griega para el «queso»; el propio término caseína procede también, de la designación latina para el «queso»).

Las diferencias entre los diversos alfa-aminoácidos radican enteramente en la naturaleza del conjunto de átomos unidos a aquel átomo de carbono único situado entre los grupos amínico y carboxílico. La glicina, el más sencillo de todos los aminoácidos, sólo tiene un par de átomos de hidrógeno unidos a aquél. Los demás poseen una «cadena lateral» de átomos de carbono unida a aquel átomo de carbono.

Expondré todavía otra fórmula de un aminoácido, que será de utilidad en relación con cuestiones posteriormente consideradas en este capítulo. Se trata de la «cistina», descubierta en 1899 por el químico alemán K. A. H. Mörner. Ésta es una molécula con dos extremos y que contiene dos átomos de azufre:



Realmente, la cistina fue aislada por vez primera en 1810 por el químico inglés William Hyde Wollaston, a partir de un cálculo vesical, y la denominó cistina basándose en la palabra griega para la «vejiga». Lo que hizo Mörner fue demostrar que este centenario compuesto era un componente de las proteínas, así como también la sustancia existente en los cálculos vesicales.

La cistina es reducida con facilidad (término que químicamente es opuesto al de «oxidado»). Esto significa que puede adicionar con facilidad dos átomos de hidrógeno, los cuales sustituirán al enlace S—S. Entonces, la molécula se dividirá en dos mitades, conteniendo cada una un —SH («mercaptano» a «tiol»). Esta mitad reducida es la «cisteína», la que a su vez es fácilmente oxidada a cistina.

La fragilidad general del grupo tiol tiene gran importancia para que una serie de moléculas proteicas realicen su función. (Un delicado equilibrio y la capacidad de adoptar una u otra de las formas en equilibrio, bajo la acción de un ligero impulso, es la característica de las sustancias químicas más importantes para la vida; los miembros del grupo tiol se encuentran entre las combinaciones de átomos que contribuyen a su existencia.) El grupo tiol es particularmente sensible a las radiaciones, y la administración de cisteína inmediatamente antes o muy poco después de la exposición a las radiaciones constituye una protección parcial contra la enfermedad por radiación. La cisteína inyectada experimenta transformaciones químicas, a las que, de otra manera, podrían hallarse expuestos componentes celulares de importancia. He aquí un tenue rayo de esperanza que se filtra a través de una oscura nube de temor.

Hasta ahora se han identificado en total 19 aminoácidos importantes (es decir, que existen en la mayoría de las proteínas). El último de ellos fue descubierto en 1935 por el químico norteamericano William Cumming Rose. Es poco probable que reste por descubrir algún otro aminoácido ampliamente extendido en la Naturaleza.

Al finalizar el siglo XIX, los bioquímicos tenían ya la certeza de que las proteínas eran moléculas gigantes constituidas por aminoácidos, al igual que la celulosa está formada por glucosa y la goma por unidades de isopreno. Pero existía una importante diferencia: mientras la celulosa y la goma estaban constituidas por un solo tipo de sillar, las proteínas estaban formadas por una serie de aminoácidos distintos. Esto significaba que la elucidación de su estructura plantearía problemas arduos y sutiles.

El primero de ellos fue determinar cómo los aminoácidos se hallaban unidos entre sí en la cadena que formaba la molécula de proteína. Emil Fischer inició la resolución del problema, al unir entre sí los aminoácidos en cadenas, de tal modo que el grupo carboxílico de un aminoácido siempre se uniera al grupo amino

del siguiente. En 1901 logró la primera condensación de este tipo; uniendo entre sí dos moléculas de glicina, con eliminación de una molécula de agua:

$$NH_2 - CH_2 - C(=O) - OH + NH_2 - CH_2 - C(=O) - OH$$
$$\downarrow$$
$$NH_2 - CH_2 - C(=O) - NH - CH_2 - C(=O) - OH + H_2O$$

Ésta es la condensación más simple posible. En 1907, Fischer había sintetizado una cadena constituida por 18 aminoácidos, 15 de ellos de glicina y los restantes 3 de leucina. Esta molécula no mostraba ninguna dé las propiedades características de las proteínas, pero Fischer supuso que esto se debía a que la cadena no era lo suficientemente larga. Denominó a sus cadenas sintéticas «péptidos», utilizando la palabra griega que significa «digestión», debido a que creyó que las proteínas se fragmentaban en tales grupos cuando eran digeridas. Fischer designó a la combinación del carbón del carboxilo con el grupo amino un «enlace peptídico».

En el año 1932, el bioquímico alemán Max Bergmann (discípulo de Fischer) ideó un método para sintetizar péptidos a partir de diversos aminoácidos. Utilizando el método de Bergmann, el bioquímico polaco-americano Joseph Stewart Fruton preparó péptidos que pudo degradar en fragmentos más pequeños mediante jugos digestivos. Desde entonces existió una buena razón para suponer que los jugos digestivos hidrolizaban (es decir, escindían por adición de agua) sólo un tipo de enlace molecular, significando esto que el enlace entre los aminoácidos, en los péptidos sintéticos, debía de ser de la misma clase que el que une a los aminoácidos en las proteínas verdaderas. Esta demostración disipó cualquier duda existente sobre la validez de la teoría peptídica de Fischer acerca de la estructura de las proteínas.

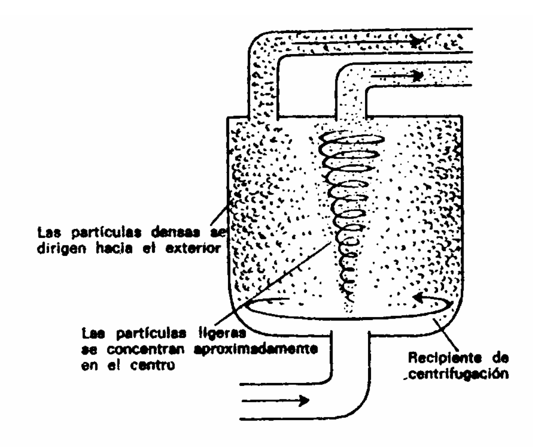
No obstante, los péptidos sintéticos eran de dimensiones muy reducidas y no mostraban ninguna de las propiedades de las proteínas. Como ya he dicho anteriormente, Fischer había sintetizado uno que consistía de 18 aminoácidos; en 1916, el químico suizo Emil Abderhalden lo aventajó en un punto, al preparar un péptido con 19 aminoácidos, conservando con ello el «récord» durante treinta años. Por lo demás, los químicos se percataron de que un péptido de estas características debía de ser un pequeño fragmento, cuando se comparaba con el tamaño de una molécula proteica, puesto que los pesos moleculares de las proteínas eran enormes.

Consideremos, por ejemplo, la hemoglobina, una proteína de la sangre. La hemoglobina contiene hierro, que representa exactamente el 0,34 % del peso de la molécula.

Los datos químicos disponibles indican que la molécula de hemoglobina contiene 4 átomos de hierro, motivo por el cual el peso molecular total deberá ser aproximadamente de 67.000; 4 átomos de hierro, con un peso total de 4 X 55,85, deberán constituir el 0,34 % de dicho peso molecular. En consecuencia, la hemoglobina deberá con tener unos 550 aminoácidos (el peso molecular medio de los aminoácidos es de, aproximadamente, 120). Compárese esta cifra con la de 19 en el péptido sintetizado por Abderhalden. Y la hemoglobina es solamente una proteína de tamaño mediano.

La medición más exacta de los pesos moleculares de las proteínas se ha logrado sometiéndolas a la acción de una centrifugadora, aparato que al girar impulsa hacia el exterior a las partículas, debido a la fuerza centrífuga. Cuando dicha fuerza sea más intensa que la de la gravedad terrestre, las partículas suspendidas en un líquido sedimentarán, separándose del centro a mayor velocidad que aquella con la que sedimentarían a consecuencia de la gravedad. Por ejemplo, los glóbulos rojos de la sangre sedimentarán rápidamente en una centrifugadora de este tipo, y la leche fresca se separará en dos fracciones: la nata y la leche desnatada, más densa. Estos tipos de separación tienen lugar

lentamente bajo las fuerzas gravitatorias ordinarias, pero la centrifugación las acelera.



Principio de la centrifugadora.

Las moléculas proteicas, aún cuando tienen gran tamaño, no son lo suficientemente pesadas para sedimentar, a partir de una solución, por la simple acción de la gravedad; ni tampoco sedimentan con rapidez en una centrifugadora ordinaria. Pero, en los años veinte de este siglo, el químico sueco Theodor Svedberg desarrolló una «ultracentrifugadora» capaz de separar a las moléculas según su peso. Este aparato, de gran velocidad, gira a más de 10.000 r.p.seg. y produce fuerzas centrífugas hasta 900.000 veces más intensas que la fuerza gravitatoria que actúa sobre la superficie de la Tierra. Por sus contribuciones al estudio de las suspensiones, Svedberg recibió en 1926 el premio Nobel de Química.

Con la ultracentrifugadora, los químicos fueron capaces de determinar los pesos moleculares de una serie de proteínas a partir de su velocidad de sedimentación (medida en «Svedbergs» en honor de aquel químico). Las proteínas pequeñas mostraron tener pesos moleculares de sólo unos pocos millares y contener quizás a lo sumo 50 aminoácidos (por supuesto, bastante más que 19). Otras proteínas tenían pesos moleculares de cientos de miles y aún de millones, lo que significaba que debían consistir de miles a decenas de millares de aminoácidos. El poseer moléculas de tan grandes dimensiones situó a las proteínas en una clase de sustancias que sólo habían sido estudiadas sistemáticamente a partir de mediados del siglo XIX.

El químico escocés Thomas Graham fue el pionero en este campo, debido a su interés en la «difusión», es decir, en la forma en que se entremezclan las moléculas de dos sustancias puestas en contacto. Inició sus investigaciones con el estudio de la velocidad de difusión de los gases a través de pequeños orificios o tubos delgados. Hacia 1831, fue capaz de demostrar que la velocidad de difusión de un gas era inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su peso molecular («Ley de Graham»). (Precisamente por el fenómeno definido por la ley de Graham pudo ser separado el uranio 235 del uranio 238.) En las décadas que siguieron, Graham pasó a estudiar la difusión de las sustancias disueltas. Halló que soluciones de compuestos tales como la sal, el azúcar o el sulfato de cobre, llegaban a atravesar un grueso pergamino (y que se podían obtener fácilmente en forma cristalina).

A aquellas sustancias que no lo hacían, tales como la cola (en griego «cola»), las denominó «coloides». El estudio de las moléculas (o agregados gigantes de átomos, aún cuando no formen moléculas aisladas) llegó a ser conocido con el término de «coloidoquímica». Puesto que las proteínas y otras moléculas clave en los tejidos vivos poseen unas dimensiones enormes, la coloidoquímica tiene una importancia particular para la «Bioquímica» (el estudio de las reacciones químicas que tienen lugar en los tejidos vivos).

Existen una serie de métodos que hacen uso provechoso de las dimensiones gigantes de las moléculas proteicas. Supongamos que el agua pura está situada a un lado de un pergamino y que existe en el otro una solución coloidal de proteína. Las moléculas proteicas no podrán atravesar la membrana; además, evitarán el paso de algunas de las moléculas del agua donde se hallan suspendidas, que de otra forma podrían atravesarla. Por este motivo, el agua penetrará más fácilmente en el interior de la parte coloidal del sistema, que saldrá de él. Ascenderá el nivel del

líquido en el lado de la solución proteica y creará una «presión osmótica».
En 1877, el botánico alemán Wilhelm Pfeffer mostró cómo podía medirse esta presión osmótica y determinar, a partir de ella, el peso de una molécula gigante. Éste fue el primer método suficientemente sensible para estimar las dimensiones de tales moléculas.
Por otra parte, las soluciones proteicas podrían situarse en sacos formados por «membranas semipermeables» (membranas con poros lo bastante grandes como para permitir el paso de las moléculas pequeñas, pero no el de las grandes). Si éstos se sumergieran en agua corriente, las moléculas pequeñas y los iones atravesarían la membrana y serían lavados, mientras que la molécula proteica de grandes dimensiones permanecería retenida. Este procedimiento de «diálisis» es el método más sencillo para purificar las soluciones proteicas.
Las moléculas de tamaño coloidal son lo suficientemente grandes como para difractar la luz; las moléculas pequeñas no lo hacen. Además, la luz de pequeña longitud de onda es difractada con mayor intensidad que aquella de longitud de onda mayor. El primero en observar este efecto, en 1869, fue el físico irlandés John Tyndall; en consecuencia, se lo denomina «efecto Tyndall». El color azul del cielo se explica ahora por el efecto de la difracción de las partículas de polvo sobre la luz solar de onda corta. En el ocaso, cuando la luz atraviesa un mayor espesor de la atmósfera, con un contenido de polvo particularmente elevado debido a la actividad del día, se dispersa suficiente cantidad de luz como para permitir sólo la aparición de los colores rojo y naranja, dando lugar así a la maravillosa tonalidad rubí de las puestas de sol.
La luz que pasa a través de una solución coloidal es difractada de tal forma que puede apreciarse un cono visible de ella cuando se observa desde un lado. Las soluciones de sustancias cristaloides no dan lugar a tal cono visible de luz, cuando se iluminan y son «ópticamente limpias». En 1902, el químico austro-alemán Richard Adolf Zsigmondy aprovechó esta observación para idear un «ultramicroscopio», mediante el cual, cuando se observa una solución coloidal bajo ángulos rectos, las partículas individuales (demasiado pequeñas para ser vistas con el microscopio ordinario) aparecen como puntos dotados de una brillante luminosidad. Por este descubrimiento le fue otorgado en 1925 el premio Nobel de Química.
Los químicos dedicados al estudio de las proteínas estaban naturalmente interesados en sintetizar cadenas «polipéptidas» largas, con la esperanza de obtener así proteínas. Pero los métodos de Fischer y Bergmann permitían sólo la adición de un aminoácido cada vez: un procedimiento de escaso interés práctico. Lo que se precisaba era un método que determinara la unión de aminoácidos, cual si se tratara de una reacción en cadena, tal como la que Baekeland había usado para obtener plásticos muy polimerizados. En 1947, el químico israelí E. Katchalski y el químico de Harvard, Robert Woodward (que había sintetizado la quinina) comunicaron haber logrado producir polipéptidos mediante una reacción de polimerización en cadena. Su material de partida era un aminoácido ligeramente modificado. (Dicha modificación se autoeliminaba totalmente durante la reacción.) Desde entonces obtuvieron polipéptidos sintéticos con incluso 100 o aún 1.000 aminoácidos.
Estas cadenas están generalmente constituidas por una sola clase de aminoácidos, tal como la glicina o la tirosina, y, por lo tanto, se denominan «poliglicina» o «politirosina». También es posible, cuando el material de partida es una mezcla de dos aminoácidos modificados, formar un polipéptido que contenga dos aminoácidos distintos en la cadena. Pero estos productos sintéticos se asemejan sólo a la clase más sencilla de proteínas: por ejemplo la «fibroína», es decir, la proteína que se encuentra en la seda.
Algunas proteínas son fibrosas y cristalinas como la celulosa o el nilón. Ejemplos de ello son la fibroína; la queratina, la proteína en el pelo y la piel; y el colágeno, la proteína en los tendones y en el tejido conjuntivo. El físico alemán R. O. Herzog demostró la capacidad de cristalizarse que tenían estas sustancias, al poner de manifiesto que difractaban los rayos X. Otro físico alemán, R.

Brill, analizó la imagen obtenida por difracción y determinó la distancia entre los átomos en la cadena polipéptida. En los años treinta de este siglo, el bioquímico británico William Thomas Astbury y otros obtuvieron más datos sobre la estructura de la cadena mediante la difracción de los rayos X. Pudieron calcular con razonable precisión las distancias entre los átomos adyacentes, así como los ángulos formados por enlaces que los unen. De este modo apreciaron que la cadena de fibroína se hallaba totalmente extendida: es decir, los átomos se disponían a lo largo de una línea tan recta como lo permitían los ángulos formados por los enlaces entre sí.

Esta disposición de la cadena polipéptida totalmente extendida es la más simple posible. Se la denomina «configuración beta». Cuando se distiende un cabello, sus moléculas de queratina, al igual que las de fibroína, adoptan esta configuración. (Si el cabello está mojado, puede ser distendido hasta 3 veces su longitud original.) Pero en su estado ordinario, no distendido, la queratina muestra una disposición más complicada, denominada «configuración alfa».

En 1951, Linus Pauling y Robert Brainard Corey, del Instituto de Tecnología de California, sugirieron que, en la configuración alfa, las cadenas polipéptidas seguían una trayectoria helicoidal (similar a la de una escalera de caracol). Después de construir varios modelos, al objeto de apreciar cómo podría ser la estructura si todos los enlaces entre los átomos se hallaran en sus direcciones naturales, sin estar sometidos a ninguna tensión, llegaron a la conclusión que cada vuelta de la hélice debería tener la longitud de 3.6 aminoácidos, o sea 5.4 unidades Ångström.

¿Qué es lo que hace posible que una hélice conserve su estructura? Pauling sugirió que el agente responsable es el denominado «enlace de hidrógeno». Como hemos visto, cuando un átomo de hidrógeno se halla unido a un átomo de oxígeno o a uno de nitrógeno, cualquiera de estos últimos retiene a los electrones de enlace compartidos, de tal modo que el átomo de hidrógeno adquiere una ligera carga positiva y el oxígeno o el nitrógeno una débil carga negativa. En la hélice, al parecer, periódicamente un átomo de hidrógeno se halla en las proximidades de un átomo de oxígeno o de nitrógeno en la vuelta de la hélice inmediatamente por encima o debajo de él.

El átomo de hidrógeno ligeramente positivo es atraído por su vecino ligeramente negativo. Esta atracción tiene una fuerza veinte veces menor que la de un enlace químico ordinario, pero es lo suficientemente intensa como para que la hélice conserve su estructura. Sin embargo, al estirar la fibra, la hélice se desenrollará fácilmente, por lo que dicha fibra se distenderá.

Hasta el momento sólo hemos considerado a la «columna vertebral» de la molécula proteica, la cadena que puede representarse por CCNCCNCCNCCN, pero las diversas cadenas laterales de los aminoácidos también desempeñan un papel importante en la estructura proteica.

Todos los aminoácidos, excepto la glicina, tienen por lo menos un átomo de carbono asimétrico —el situado entre el grupo carboxilo y el grupo amino—. Por este motivo cada uno de ellos debería existir en los dos isómeros ópticamente activos. Las fórmulas generales de los dos isómeros son:

Sin embargo, parece totalmente demostrado, a partir de los análisis químicos y con rayos X, que las cadenas polipéptidas están constituidas únicamente por L-aminoácidos. En este caso, las cadenas laterales se desprenden alternativamente de un lado de la columna vertebral y luego del otro. Una cadena constituida por una mezcla de ambos isómeros no sería estable, debido a que, si un L-aminoácido y un D-aminoácido se hallaran uno junto al otro, habría dos cadenas laterales que se extenderían a partir del mismo lado, lo que determinaría que estuvieran tan próximas una de otra que los enlaces resultarían sometidos a tensión. Las cadenas

laterales son elementos importantes de unión entre las cadenas polipéptidas vecinas. Allí donde una cadena lateral cargada negativamente, perteneciente a una cadena, se halle próxima a una cadena lateral carga da positivamente, perteneciente a una vecina, se formará un enlace electrostático. Las cadenas laterales también permiten la formación de enlaces de hidrógeno que pueden actuar como puentes de unión. Y el aminoácido con dos extremos, la cistina, puede insertar una de sus secuencias grupo amino-grupo carboxilo en una cadena y la otra en la próxima. Entonces las dos cadenas se hallarán unidas por los dos átomos de azufre en la cadena lateral (el «enlace disulfuro»). La unión de las cadenas polipéptidas aumenta la resistencia de las fibras proteicas. Esto explica la considerable resistencia del hilo de araña, aparentemente frágil, y el hecho de que la queratina pueda formar estructuras tan duras como las uñas de los dedos, las garras del tigre, las escamas del caimán y los cuernos del rinoceronte.

Todo lo expuesto hasta aquí describe bellamente la estructura de las fibras proteicas. ¿Qué ocurre con las proteínas en solución? ¿Qué tipo de estructura adquieren entonces? En realidad poseen una estructura definida que, no obstante, es extremadamente delicada; un suave calentamiento, la agitación de la solución, la adición de una pequeña cantidad de ácido o de álcali, o cualquiera de una serie de influencias ambientales, pueden «desnaturalizar» una proteína disuelta. Es decir, la proteína pierde la capacidad de realizar sus funciones naturales y se alteran muchas de sus propiedades. Además, la desnaturalización es, por lo general, un proceso irreversible: por ejemplo, un huevo intensamente cocido nunca podrá transformarse de nuevo en un huevo crudo.

Parece evidente que la desnaturalización implica la pérdida de alguna configuración específica de la columna vertebral de los polipéptidos. ¿Qué es lo que se destruye en la estructura? La difracción de los rayos X no nos puede prestar su ayuda cuando las proteínas se hallan en solución, pero disponemos de otras técnicas.

Por ejemplo, en 1928, el físico hindú Chandrasejara Venkata Raman halló que la luz dispersada por las moléculas en solución era, hasta cierto punto, alterada en su longitud de onda. De la naturaleza de la alteración podía deducirse la estructura de la molécula. Por este descubrimiento del «efecto Raman», dicho investigador recibió en el año 1930 el premio Nobel de Física. (Las longitudes de onda alteradas de la luz son, por lo común, denominadas «el espectro Raman» de la molécula que determina la dispersión.) A finales de los años veinte, se desarrolló otra delicada técnica, la basada en el hecho de que los núcleos atómicos poseen propiedades magnéticas. Las moléculas expuestas a un campo magnético de gran intensidad absorberán ciertas radiofrecuencias. A partir de tal absorción, denominada «resonancia magnética nuclear», y frecuentemente abreviada como RMN, puede obtenerse información sobre los enlaces entre los átomos. En particular, las técnicas basadas en la RMN pueden localizar la posición de los pequeños átomos de hidrógeno en el interior de las moléculas, lo que no puede conseguirse a partir de la difracción de los rayos X. Las técnicas basadas en la RMN fueron elaboradas en 1946 por dos equipos que trabajaban independientemente, uno bajo la dirección de E. M. Purcell (que más tarde fue el primero en detectar las radioondas emitidas por los átomos de hidrógeno neutros en el espacio; véase capítulo 11), y el otro bajo la dirección del físico suizo-americano Felix Bloch. Por esta proeza, Purcell y Bloch compartieron el premio Nobel de Física en 1952.

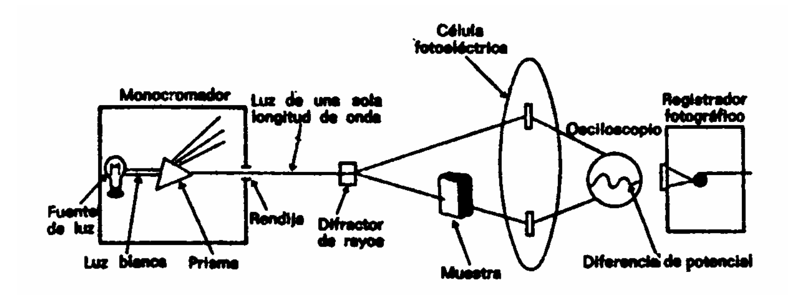
Volvamos a la cuestión de la desnaturalización de las proteínas en solución. Los químicos norteamericanos Paul Mead Doty y Elkan Rogers Blout, usando técnicas de difracción de la luz en soluciones de polipéptidos sintéticos, descubrieron que éstos poseían una estructura helicoidal.

Por modificación de la acidez de la solución pudieron romper las hélices en fragmentos curvados al azar; al restaurar la acidez original, lograron recomponer las hélices, y mostraron así que la conversión de las hélices en fragmentos curvados al azar reducía la actividad óptica de la solución. Fue entonces posible indicar de qué manera se curvaba la hélice proteica: tal como lo hace la rosca dextrógira de un tornillo.

Todo esto sugiere que la desnaturalización de una proteína implica la destrucción de su estructura helicoidal.

Aminoácidos En La Cadena

Lo que he descrito hasta el momento representa una visión de conjunto de la estructura de la molécula proteica: la forma general de la cadena. ¿Cuáles son los detalles de su estructura? Por ejemplo, ¿cuántos aminoácidos de cada clase existen en una molécula proteica determinada? Podemos fragmentar una molécula proteica en sus aminoácidos (calentándola con un ácido) y luego determinar la cantidad de cada aminoácido que se halla presente en la mezcla. Desgraciadamente, algunos de los aminoácidos se parecen químicamente tanto entre sí, que es casi imposible obtener separaciones claras mediante los métodos químicos ordinarios. Sin embargo, los aminoácidos pueden separarse limpiamente mediante la cromatografía (véase capítulo V). En el año 1941, los bioquímicos británicos Archer John, Porter Martin y Richard Laurence Millington Synge fueron los primeros en aplicar la cromatografía a este objetivo. Introdujeron el empleo del almidón como material de relleno en la columna. En el año 1948, los bioquímicos estadounidenses Stanford Moore y William Howard Stein lograron convertir la cromatografía sobre almidón de los aminoácidos en un método analítico muy eficaz.
Después de que la mezcla de aminoácidos ha sido vertida en el interior de la columna de almidón y todos ellos se han unido a las partículas del material de relleno, los aminoácidos son lentamente arrastrados en sentido descendente a lo largo de la columna, al pasar el eluyente a su través. Cada aminoácido se desplaza hacia la parte inferior de la columna a una velocidad que le es característica. A medida que se desprenden separadamente de ésta, las gotas de la solución de cada uno de los aminoácidos se recogen en un recipiente distinto. La solución en cada recipiente se trata posteriormente con un reactivo que convierte el aminoácido en un producto coloreado. La intensidad del color indica la cantidad del aminoácido particular presente. A su vez, esta intensidad del color se mide utilizando un instrumento denominado «espectrofotómetro», que señala dicha intensidad en función de la cantidad de luz absorbida de una determinada longitud de onda.



[4]

(Los espectrofotómetros pueden utilizarse para otros tipos de análisis químicos, como es de suponer. Si se hace pasar luz, de longitud de onda progresivamente creciente a través de una solución, la magnitud de la absorción varía ligeramente, alcanzando valores máximos en ciertas longitudes de onda y manifestando valores mínimos en otras. El resultado es un registro denominado «espectro de absorción». Un determinado grupo atómico posee su propio pico o picos de absorción característicos. Esto se aprecia particularmente en la región de los infrarrojos, tal como demostró por vez primera el físico norteamericano William Weber Coblentz poco después de 1900. Sus instrumentos tenían por entonces tan escasa sensibilidad que la técnica no resultaba de utilidad, pero, desde la Segunda Guerra Mundial, el

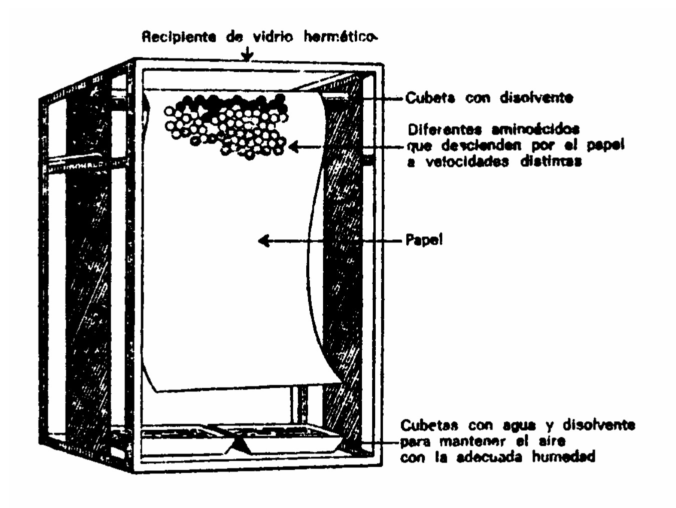
---

[4] Un espectrofotómetro. El haz de luz es dividido en dos, de tal modo que uno de los haces pase a través de la muestra que se está analizando y el otro incida directamente sobre la célula fotoeléctrica. Puesto que el haz de menor intensidad que ha atravesado la muestra libera menos electrones en la célula fotoeléctrica de lo que lo hace el haz no absorbido, los dos haces crean una diferencia de potencial que mide la cantidad de luz absorbida por la muestra.

«espectrofotómetro de infrarrojos» ideado para rastrear automáticamente el espectro desde los 2 a los 40 micrones y registrar los resultados, se ha venido utilizando cada vez más para el análisis de la estructura de compuestos complejos. «Los métodos ópticos» del análisis químico, que implica la absorción de ondas de radio, la absorción de la luz, su difracción, etc., son extremadamente «innocuos» y no alteran al producto estudiado —en otras palabras, la muestra investigada sobrevive a la investigación— y están remplazando totalmente los métodos analíticos clásicos de Liebig, Dumas y Pregl, que se mencionaron en el capítulo anterior.) La determinación de los aminoácidos mediante la cromatografía sobre almidón es plenamente satisfactoria, pero en la época en que este procedimiento se desarrolló, Martin y Synge elaboraron un método más simple de cromatografía. Es el denominado «cromatografía sobre papel». Los aminoácidos se separan sobre una hoja de papel de filtro (un papel absorbente constituido por celulosa particularmente pura). Una o dos gotas de una mezcla de aminoácidos se colocan cerca de uno de los ángulos de la hoja y uno de sus lados se sumerge en un disolvente, como por ejemplo el alcohol butílico. El disolvente asciende lentamente por el papel, por capilaridad. (Se puede hacer la prueba sumergiendo la punta de un secante en agua y comprobar así lo que ocurre.) El disolvente arrastra las moléculas en la gota depositada y las desplaza a lo largo del papel. Como en la cromatografía en columna, cada uno de los aminoácidos se mueve, esta vez en sentido ascendente, por el papel a una velocidad característica. Después de un cierto período de tiempo, los aminoácidos de la mezcla aparecen separados en una serie de manchas sobre el papel. Algunas de las manchas pueden contener dos o tres aminoácidos. Para separarlos, el papel de filtro, tras haberse secado, se hace girar 90º con respecto a su posición primitiva, y el nuevo borde se sumerge a continuación en un segundo disolvente, que dispondrá a los componentes en manchas separadas. Finalmente, toda la hoja, tras haber sido secada de nuevo, se lava con reactivos químicos, los cuales determinan que las áreas ocupadas por los aminoácidos aparezcan como manchas coloreadas u oscuras. Es algo que merece sin duda la pena ser visto: todos los aminoácidos, originalmente mezclados en una única solución, aparecen ahora distribuidos a lo largo y a lo ancho del papel, formando un mosaico de manchas de vivos colores. Los bioquímicos experimentados pueden identificar cada aminoácido por la posición que muestran sus manchas correspondientes, y leer de este modo la composición de la proteína original casi a simple vista. Por disolución de los componentes de la mancha, pueden asimismo medir la cantidad del aminoácido particular presente en la proteína.

(Martin, junto con A. T. James, aplicaron los principios de esta técnica a la separación de gases en el año 1952. Mezclas de gases o vapores pueden hacerse pasar a través de un disolvente líquido o de un sólido absorbente mediante la corriente de un «gas transportador» inerte, tal como el nitrógeno o el helio. La mezcla atraviesa el medio de separación y aparecen sus componentes individuales por el otro extremo. La «cromatografía de gases» es de particular utilidad, debido a la velocidad con que realiza las separaciones y a la gran sensibilidad con que puede detectar trazas de impurezas.) Los análisis cromatográficos han permitido valorar con exactitud el contenido de aminoácidos de diversas proteínas. Por ejemplo, se ha observado que la molécula de una proteína de la sangre, denominada «albúmina sérica», contiene 15 moléculas de glicina, 45 de valina, 58 de leucina, 9 de isoleucina, 31 de prolina, 33 de fenilalanina, 18 de tirosina, 1 de triptófano, 22 de serina, 27 de treonina, 16 de cistina, 4 de cisteína, 6 de metionina, 25 de arginina, 16 de histidina, 58 de lisina, 56 de ácido aspártico y 80 de ácido glutámico; o sea, un total de 526 aminoácidos de 18 tipos distintos, constituyendo una proteína con un peso molecular de aproximadamente 69.000. (Además de estos 18, existe aún otro aminoácido de frecuente aparición: la alanina.) El bioquímico germano-americano Erwin Brand sugirió un sistema de símbolos para los aminoácidos, que hoy en día es de uso general. Para evitar confusiones con los símbolos de los elementos, designó a cada aminoácido con las tres primeras letras de su nombre, en vez de

hacerlo únicamente con la inicial. Sólo existen algunas variaciones especiales: la cistina se simboliza con la sigla



Cromatografia sobre papel.

CiS, para indicar así que sus dos mitades generalmente se hallan incorporadas a dos cadenas diferentes; la cisteína es representada por CiSH, para distinguirla de la cistina; y la isoleucina, por Ileu, en vez de Iso, pues «Iso» es el prefijo que se utiliza en muchos nombres químicos.

Abreviadamente, la fórmula de la albúmina sérica puede escribirse así:

$Gli_{15}Val_{45}Leu_{38I}Ileu_{9}Pro_{31}Fe_{33}Tir_{18}Tri_{1}Ser_{22}Tr_{27}CiS_{32}CiSH_{4}Met_{6}Arg_{52}His_{16}Lis_{58}Asp_{46}Glu_{80}$. Esto, desde luego, es más conciso, aunque evidentemente no pueda decirse con rapidez.

El descubrimiento de la fórmula empírica de la proteína tan sólo representó vencer en la primera mitad de la batalla; en realidad, mucho menos que la mitad. Se planteaba entonces el problema, considerablemente más difícil, de descifrar la estructura de una molécula proteica. Existían toda una serie de razones para suponer que las propiedades de cada proteína dependían de cómo exactamente —es decir, en qué orden— se hallaban dispuestos todos aquellos aminoácidos en la cadena molecular. He aquí realmente un problema de tanta envergadura que puede causar vértigos al más avezado bioquímico. El número de las permutaciones posibles en que los 19 aminoácidos pueden hallarse situados en una cadena (incluso suponiendo que únicamente entre a formar parte de ella uno de cada uno de los aminoácidos) es de aproximadamente 120 billones. Si resulta difícil creerlo, basta con intentar multiplicar 19 veces por 18 X 17 X 16 y así sucesivamente, que es la forma de calcular el número posible de permutaciones, y, en caso de no fiarse de la aritmética, tome 19 fichas del juego de damas, numérelas del 1 al 19 y compruebe luego en cuántos órdenes diferentes puede disponerlas. Le garantizo que no continuará el juego durante mucho tiempo.

Cuando nos enfrentamos con una proteína del tamaño de la albúmina sérica, compuesta de más de 500 aminoácidos, el número de posibles permutaciones llega a ser del orden de los 1^{600} —es decir, un 1 seguido de 600 ceros—. Éste es un número totalmente fantástico, muy superior al número de partículas subatómicas en todo el Universo conocido, o, siguiendo en el tema, mucho mas de lo que el Universo podría contener si fuera un conglomerado sólido constituido por tales partículas.

No obstante, aunque pueda parecer abocada al fracaso la tarea de hallar cuál de todas aquellas posibles permutaciones es la que realmente representa una molécula de albúmina sérica, este tipo de problema ha sido en la actualidad planteado y resuelto.

En el año 1945, el bioquímico británico Frederick Sanger determinó el orden de los aminoácidos en una cadena peptídica. Comenzó intentando identificar el aminoácido en un extremo de la cadena: el extremo amina.

Evidentemente, el grupo amínico de este aminoácido terminal (denominado el «aminoácido N-terminal») está libre: es decir, no se halla unido a otro aminoácido. Sanger hizo uso de un reactivo químico que se combina con un grupo amínico libre, pero que no lo hace con un grupo amínico que esté unido a un grupo carboxílico. Éste da lugar a un derivado DNF (dinotrofenílico) de

la cadena peptídica. Este investigador pudo marcar el aminoácido N-terminal con el DNF, y, ya que el enlace que permite esta combinación es más fuerte que aquellos que unen a los aminoácidos en la cadena, pudo romper ésta en sus aminoácidos individuales y aislar a aquél marcado con el DNF. Puesto que el grupo DNF tiene un color amarillo, este aminoácido particular, marcado por el DNF, aparece como una mancha amarilla en el cromatograma sobre papel.
Así, Sanger pudo separar e identificar el aminoácido en el extremo amínico de una cadena peptídica. De manera similar, identificó el aminoácido en el otro extremo de la cadena: aquél con un grupo carboxílico libre, denominado el «aminoácido C-terminal». También fue capaz de separar algunos otros aminoácidos, uno a uno, e identificar en algunos casos la «secuencia terminal» de una cadena peptídica. Sanger procedió a atacar la cadena peptídica en toda su longitud. Estudió la insulina, una sustancia de gran importancia funcional para el organismo, que posee además la virtud de ser una proteína relativamente pequeña, con un peso molecular de sólo 6.000, en su forma más simple. El tratamiento con DNF reveló que esta molécula consistía en dos cadenas peptídicas, pues contenía dos aminoácidos N-terminales. Las dos cadenas se hallaban unidas entre sí por moléculas de cistina. Mediante un tratamiento químico que rompía los enlaces entre los dos átomos de azufre en la cistina, Sanger escindió la molécula de insulina en sus dos cadenas peptídicas, cada una de ellas intacta. Una de las cadenas tenía la glicina como aminoácido N-terminal (denominado por él la cadena G), y la otra tenía la fenilalanina como el aminoácido N-terminal (la cadena P). Ahora podían ser estudiadas separadamente ambas cadenas.
Sanger y un colaborador, Hans Tuppy, fragmentaron primero las cadenas en los aminoácidos constituyentes e identificaron los 21 aminoácidos que formaban la cadena G y los 30 que componían la cadena P. Luego, para establecer algunas de las secuencias, rompieron las cadenas, no en aminoácidos individuales, sino en fragmentos constituidos por 2 ó 3 aminoácidos. Esto podía realizarse por hidrólisis parcial, la cual fragmentaba sólo los enlaces más débiles en la cadena, o bien atacando la insulina con ciertas sustancias digestivas, que sólo rompían determinados enlaces entre aminoácidos y dejaban intactos a los restantes.
De este modo, Sanger y Tuppy fragmentaron cada una de las cadenas en un gran número de piezas distintas. Por ejemplo, la cadena P dio lugar a 48 fragmentos distintos, 22 de los cuales estaban formados por dos aminoácidos (dipéptidos), 14 por tres y 12 por más de tres aminoácidos.
Los diversos péptidos de pequeñas dimensiones, después de ser separados, podían ser fragmentados en sus aminoácidos individuales por cromatografía sobre papel. Así, pues, los investigadores estaban ya en disposición de determinar el orden de los aminoácidos en cada uno de estos fragmentos. Supongamos que poseyeran un dipéptido constituido por la valina y la isoleucina. El problema que entonces se plantearía podría ser: ¿El orden era el de Val-Ileu o el de Ileu-Val? En otras palabras, ¿era la valina, o la isoleucina, el aminoácido N-terminal? (El grupo amínico y, en consecuencia, la unidad N-terminal, se considera convencionalmente que se halla situado en el extremo izquierdo de una cadena.) Aquí el marcado con el DNF podía dar la respuesta. Si se hallaba presente sobre la valina, éste sería el aminoácido N-terminal, y el orden de los aminoácidos en el diséptido sería Val-Ileu. Si se hallara sobre la isoleucina, entonces sería el de Ileu-Val.
También pudo resolverse el orden de sucesión de los aminoácidos en un fragmento constituido por tres de ellos. Supongamos que sus componentes fueran la leucina, la valina y el ácido glutámico. La prueba con el DNF identificaría el aminoácido N-terminal. Si éste fuera, por ejemplo, la leucina, el orden debería ser, o bien Leu-Val-Glu, o bien Leu-Glu-Val. Luego, se sintetizó cada una de estas combinaciones y se depositó en forma de una mancha sobre un cartograma, para ver cuál ocupaba sobre el papel el mismo lugar que el ocupado por el fragmento que estaba estudiando.
Por lo que se refiere a los péptidos de más de 3 aminoácidos, éstos podían fragmentarse en otros más pequeños para su análisis ulterior.

Después de determinar las estructuras de todos los fragmentos en que había sido dividida la molécula de insulina, la fase siguiente era reunir todas las piezas entre sí, disponiéndolas en el orden correcto en la cadena, a la manera de un rompecabezas en zigzag. Existían una serie de incógnitas para despejar. Por ejemplo, se sabía que la cadena G solamente contenía una unidad del aminoácido anilina. En la mezcla de péptidos obtenida por fragmentación de las cadenas-G, la alanina se halló en dos combinaciones: alanina-serina y cistina-alanina. Esto significaba que, en la cadena G intacta, el orden debía ser Cis-Ala-Ser. Mediante tales indicios, Sanger y Tuppy fueron reuniendo gradualmente las piezas del rompecabezas. Les llevó un par de años identificar la totalidad de los fragmentos de forma definitiva y disponerlos en una secuencia absolutamente satisfactoria, pero, hacia el año 1952, habían logrado establecer la disposición exacta de todos los aminoácidos en la cadena G y en la cadena P. Seguidamente, se dedicaron a establecer de qué modo se hallaban unidas entre sí las dos cadenas. En 1953, obtuvieron su triunfo final con el desciframiento de la estructura de la insulina. La estructura completa de una molécula proteica importante se había dilucidado por vez primera. Por este logro, a Sanger le fue concedido el premio Nobel de Química en 1958.
Los bioquímicos adoptaron inmediatamente los métodos de Sanger para determinar la estructura de otras moléculas proteicas. La ribonucleasa, una molécula proteica que consta de una única cadena peptídica con 124 aminoácidos, fue conquistada en 1959, y la unidad proteica del virus del mosaico del tabaco, con 158 aminoácidos, en el año 1960. En 1964 fue a su vez descifrada la tripsina, una molécula con 223 aminoácidos.
En 1967 se automatizó esta técnica. El bioquímico sueco-australiano P. Edman creó un «secuenciador» que podía trabajar con 5 mg de proteína pura, «descascarillando» e identificando los aminoácidos uno por uno. De este modo, en cuatro días fueron identificados sesenta aminoácidos de la cadena de la mioglobina.
Una vez dilucidado el orden de los aminoácidos en la cadena polipeptídica, resultó posible intentar unir a los aminoácidos en el orden correcto. Naturalmente, los comienzos fueron modestos. La primera proteína sintetizada en el laboratorio fue la «oxitocina», una hormona con importantes funciones en el organismo. La oxitocina es extremadamente pequeña para poder ser considerada realmente una molécula proteica: se compone únicamente de 8 aminoácidos. En 1953, el bioquímico americano Vincent du Vigneaud logró sintetizar una cadena peptídica exactamente igual a aquella que, al parecer, representaba la molécula de exoticina. Y, además, el péptido sintético mostraba todas las propiedades de la hormona natural. A Du Vigneaud se le otorgó el premio Nobel de Química del año 1955.
Con el paso de los años se sintetizaron moléculas proteínicas cada vez más complejas, pero si se quisiera sintetizar una molécula específica con especiales aminoácidos dispuestos en un orden preconcebido, sería preciso «enhebrar la sarta» por así decirlo, paso a paso. En los años 1950 eso resultó tan dificultoso como medio siglo antes, es decir, la época de Fischer. Cada vez que se consiguió aparejar un aminoácido determinado con una cadena, fue preciso separar el nuevo compuesto del resto mediante procedimientos sumamente laboriosos y luego partir nuevamente desde el principio para agregar otro aminoácido determinado. Con cada paso se perdió una porción considerable del material en reacciones secundarias y, por tanto, sólo fue posible formar cantidades mínimas de cadenas sin excluir siquiera las más elementales.
Sin embargo, hacia principios de 1959, un equipo bajo la dirección del bioquímico norteamericano Robert Bruce Merrifield, tomó una orientación inédita: un aminoácido, comienzo de la ambicionada cadena, asociado a los glóbulos de la resina de poliestireno. Tales glóbulos fueron insolubles en el líquido utilizado y de este modo resultó fácil separarlos de todo lo restante mediante una sencilla filtración. Se agregó cada nueva solución conteniendo el siguiente aminoácido que se asociase con el anterior. Otra filtración, otra más y así sucesivamente. Los manejos entre esas adiciones fueron tan simples y rápidos que se les pudo automatizar con muy escasas pérdidas. En 1965 se sintetizó por este medio la molécula de

insulina; en 1969 le llegó el turno a la cadena todavía más larga de los ribonucleicos con sus 124 aminoácidos. Más tarde, en 1970, el bioquímico estadounidense de origen chino Cho Hao Li sintetizó la hormona del crecimiento humano, una cadena de 188 aminoácidos.

Con la molécula proteínica entendida, por así decirlo, como una hilera de aminoácidos, parecía conveniente obtener una visión aún más sofisticada. ¿Cuál era la manera exacta en que la cadena de aminoácidos se inclinaba y curvaba? ¿Cuál era la forma exacta de la molécula proteínica? Enfrascados en este problema se hallaban el químico austro-inglés Max Ferdinand Perutz y su colega inglés John Cowdery Kendrew. Perutz tomó como objeto de estudio la hemoglobina, la proteína de la sangre que transporta el oxígeno y que contiene unos 12.000 átomos. Kendrew estudió la mioglobina, una proteína muscular, similar en su función a la hemoglobina, pero sólo con una cuarta parte de su tamaño. Como herramienta utilizaron los estudios de difracción de los rayos X.

Perutz empleó el ardid de combinar las moléculas proteicas con un átomo pesado, como el del oro o el mercurio, átomo que era particularmente eficaz en difractar los rayos X. Esto les proporcionó algunas pistas, a partir de las que pudo deducir con más exactitud la estructura de la molécula, sin dicho átomo pesado. Hacia el año 1959, la mioglobina, y, un año más tarde, la hemoglobina, fueron dilucidadas estructuralmente. Fue posible preparar modelos tridimensionales en los cuales se situaba cada uno de los átomos en el lugar que parecía ser con mayor probabilidad el correcto. En ambos casos, la estructura proteica se basaba claramente en la helicoidal. Como resultado de sus investigaciones, Perutz y Kendrew compartieron el premio Nobel de Química de 1962.

Hay buenas razones para creer que las estructuras tridimensionales elaboradas mediante los procedimientos técnicos de Perutz-Kendrew, quedan determinadas al fin y al cabo por la naturaleza de los encadenamientos de aminoácidos. Las cadenas de aminoácidos tienen «puntos de repliegue», por así decirlo, y cuando se doblan sobrevienen inevitablemente ciertas interconexiones que las mantienen debidamente plegadas. Para determinar cuáles son esos pliegues e interconexiones es preciso calcular todas las distancias interatómicas y los ángulos que forman los eslabones de conexión. Esta tarea es realizable, pero extremadamente tediosa. Aquí se ha pedido también ayuda a las computadoras; éstas han realizado todos los cálculos y, por si fuera poco, han escrito el resultado en una pantalla.

Entre unas cosas y otras, la lista de moléculas proteínicas cuyas formas se conocen a escala tridimensional, está alargándose rápidamente. La insulina, iniciadora de los nuevos sondeos en la biología molecular, ha encontrado ya su forma tridimensional gracias a la bioquímica inglesa Dorothy Crowfoot Hodgkin (1969).

Enzimas

Por supuesto, existe una buena razón para justificar la complejidad y casi infinita variedad que manifiestan las moléculas proteicas. Las proteínas tienen una multiplicidad de funciones que cumplir en los organismos vivos.

Una de ellas, de cierta importancia, es constituir el armazón estructural del cuerpo. De la misma manera que la celulosa constituye el armazón de las plantas, así las proteínas fibrosas cumplen el mismo papel en los animales complejos. Las arañas producen los hilos de sus telas, y las larvas de insectos las hebras de sus capullos, en ambos casos gracias a las fibras proteicas. Las escamas de los peces y los reptiles están constituidas principalmente por la proteína denominada queratina. Los pelos, plumas, cuernos, pezuñas, garras y uñas de los dedos —todo ello simplemente escamas modificadas— también contienen queratina. La piel debe su resistencia y flexibilidad a su elevado contenido de queratina. Los tejidos de sostén internos —cartílago, ligamentos, tendones, e incluso el armazón orgánico de los huesos— están constituidos en gran parte por moléculas proteicas tales como el colágeno y la elastina. A su vez, el músculo está formado por una proteína fibrosa compleja denominada actomiosina.

En todos estos casos, las fibras proteicas son algo más que un simple sustitutivo de la celulosa. Representan un perfeccionamiento; son más resistentes y más flexibles. La celulosa podrá soportar una planta que no tenga que realizar más que el simple movimiento de doblarse bajo la acción del viento. Pero las fibras proteicas tienen la misión de plegar y flexionar los apéndices del cuerpo, debiendo estar adaptadas a movimientos rápidos, vibraciones, etc.

Sin embargo, las fibras se encuentran entre las proteínas más sencillas, tanto en su forma como en su función. La mayoría de las otras proteínas tienen funciones mucho más sutiles y complejas que realizar.

Para mantener la vida en todos sus aspectos, deben producirse numerosas reacciones químicas en el organismo. Éstas se producen a una velocidad elevada y con gran diversidad, hallándose además cada reacción íntimamente relacionada con las restantes, pues no es sólo una, sino de todas ellas conjuntamente, que dependen los fluidos procesos vitales. Además, todas las reacciones deben producirse en el más suave de los medios ambientes: sin altas temperaturas, reactivos químicos enérgicos o presiones elevadas. Las reacciones deben hallarse bajo un control estricto, y a la vez flexible, y deben ser constantemente ajustadas a las variables características del medio ambiente y a las distintas necesidades momentáneas del organismo. La indebida reducción de la velocidad o la aceleración de incluso una sola reacción, entre los muchos miles de ellas, desorganizaría más o menos gravemente al organismo.

Todo esto es realizado por las moléculas proteicas.

Hacia finales del siglo XVIII, los químicos, siguiendo las enseñanzas de Lavoisier, comenzaron a estudiar las reacciones químicas de forma cuantitativa; en particular para medir las velocidades a que se producían dichas reacciones.

Inmediatamente observaron que la velocidad de las reacciones podía ser drásticamente modificada por alteraciones pequeñas en comparación con el medio ambiente. Por ejemplo, cuando Kirchhoff descubrió que el almidón podía ser convertido en azúcar en presencia de ácido, apreció también que el ácido aceleraba considerablemente la reacción, aunque no se consumía en el proceso. Pronto se descubrieron otros ejemplos de este fenómeno.

El químico alemán Johann Wolfgang Döbereiner halló que el platino finamente dividido (denominado negro de «platino») favorece la combinación del hidrógeno y el oxígeno para formar agua; una reacción que, sin esta ayuda, sólo tendría lugar a una temperatura elevada. Döbereiner diseñó incluso una lámpara que entraba automáticamente en ignición y en la que un chorro de hidrógeno, proyectado sobre una superficie revestida de negro de platino, provocaba la llama.

Debido a que las reacciones aceleradas procedían generalmente en el sentido de descomponer una sustancia compleja en una más simple, Berzelius denominó al fenómeno «catálisis» (de las palabras griegas que esencialmente significan «descomponer»).

Así, el negro de platino fue designado como catalizador de la combinación del hidrógeno y el oxígeno, y el ácido como catalizador de la hidrólisis del almidón en glucosa. La catálisis ha resultado ser de la máxima importancia en la industria. Por ejemplo, la mejor manera de fabricar ácido sulfúrico (el producto químico inorgánico simple más importante, del mismo orden de significación que el aire, el agua y quizá la sal) implica la combustión del azufre, primero en dióxido de azufre (SO_2) y luego en trióxido de azufre (SO_3). La conversión de dióxido a trióxido se realizaría a la velocidad del caracol sin la ayuda de un catalizador tal como el negro de platino. El níquel finamente dividido (que ha remplazado al negro de platino en la mayor parte de los casos, debido a que es más barato), y compuestos tales como el cromito de cobre, el pentóxido de vanadio, el óxido férrico y el dióxido de manganeso también son importantes catalizadores. En realidad, gran parte del éxito de un proceso químico industrial depende de hallar el adecuado catalizador para la reacción en él involucrada.

El descubrimiento por Ziegler de un nuevo tipo de catalizador revolucionó la producción de los polímeros.

¿Cómo es posible que una sustancia, algunas veces presente en concentraciones muy pequeñas, determine reacciones

cuantitativamente importantes, sin que ella misma se altere? Bien, en realidad parte del catalizador interviene en la reacción, pero haciéndolo en forma cíclica, de tal modo que continuamente vuelve a recuperar su naturaleza original. Un ejemplo lo constituye el pentóxido de vanadio (O_5V_2), que puede catalizar la transformación del dióxido de azufre en trióxido de azufre. El pentóxido de vanadio cede uno de sus oxígenos al SO_2, formándose SO_3 y transformándose el mismo en el óxido de vanadilo (O_4V_2). Pero el óxido de vanadilo reacciona rápidamente con el oxígeno del aire y vuelve a formarse el O_5V_2 Así, pues, el pentóxido de vanadio actúa como un intermediario, cediendo un átomo de oxígeno al dióxido de azufre, tomando otro a partir del aire, cediéndolo de nuevo a otra molécula de dióxido de azufre, y así sucesivamente. El proceso es tan rápido que una pequeña cantidad del pentóxido de vanadio será suficiente para determinar la conversión de grandes cantidades de dióxido de azufre. Y, al final, nos parecerá que el pentóxido de vanadio no ha experimentado modificación alguna.

En el año 1902, el químico alemán George Lunge sugirió que este tipo de proceso era la explicación de la catálisis en general. En 1916, Irving Langmuir avanzó un paso más y aportó una explicación para la acción catalítica de ciertas sustancias, tales como el platino, tan poco reactivas que no es de esperar que se hallen implicadas en reacciones químicas ordinarias. Langmuir sostuvo que el exceso de enlaces de valencia en la superficie del metal de platino escindiría las moléculas del hidrógeno y el oxígeno. Al entrar en íntimo contacto con la superficie de platino, las moléculas del hidrógeno y el oxígeno podrían combinarse mucho más fácilmente para formar moléculas de agua, que en su estado libre ordinario como moléculas gaseosas, y, una vez formada una molécula de agua, ésta sería desplazada de la superficie del platino por moléculas de hidrógeno y oxígeno. Así, el proceso de escisión del hidrógeno y el oxígeno, su combinación en agua, la liberación de ésta, la escisión de más hidrógeno y oxígeno, y la transformación de más agua continuaría de forma indefinida.

Este fenómeno se denomina «catálisis de superficie». Por supuesto, cuanto más finamente se halle dividido el metal, tanta más superficie ofrecerá una masa dada y con tanta mayor eficacia podrá producirse la catálisis. Por supuesto, si una sustancia extraña se une firmemente a los enlaces superficiales del platino, «envenenará» al catalizador.

Todos los catalizadores de superficie son más o menos selectivos o «específicos». Algunos absorben fácilmente moléculas de hidrógeno y catalizan reacciones en las que se halla implicado el hidrógeno; otros absorben con facilidad moléculas de agua y catalizan condensaciones o hidrólisis, etc.

La capacidad de las superficies para captar capas de moléculas («adsorción») la manifiestan muchas sustancias y puede aplicarse a otros usos distintos del de la catálisis. El dióxido de silicio preparado en forma esponjosa («gel de silicio») adsorberá grandes cantidades de agua.

En el acondicionamiento del equipo electrónico, cuyo rendimiento sufriría sometido a condiciones de humedad elevada, actúa como «desecador», reduciendo la humedad al mínimo.

Por otra parte, el carbón finamente dividido («carbón activado») adsorberá con facilidad moléculas orgánicas; cuanto mayor sea la molécula orgánica, tanto más fácilmente será adsorbida. El carbón activado puede ser utilizado para decolorar soluciones, pues adsorberá las impurezas coloreadas (por lo general de peso molecular elevado) dejando sin adsorber a la sustancia deseada (por lo general incolora y de peso molecular comparativamente bajo).

El carbón activado también se ha utilizado en las máscaras antigás. Su uso ya fue previsto por el físico inglés John Stenhouse, quien por vez primera preparó un filtro de carbón para el aire en el año 1853. El oxígeno y el nitrógeno del aire pasan a través de una máscara de este tipo sin dificultad, pero son adsorbidas las moléculas relativamente grandes de los gases venenosos.

El mundo orgánico también posee sus catalizadores. En realidad, algunos de ellos se conocen desde hace miles de años, aunque no por el mismo nombre. Son tan antiguos como la fabricación del

pan y la elaboración del vino. La masa de pan, abandonada a sí misma, y protegida de la contaminación de las influencias ambientales, no fermentará. Si se añade una pizca de «levadura» (de la palabra latina que significa «subir»), aparecerán burbujas, que hincharán la masa y la harán más ligera.

La levadura también acelera la conversión de los zumos de frutas y granos en alcohol. Aquí de nuevo, la conversión implica la formación de burbujas, de tal modo que el proceso se ha denominado «fermentación», a partir de la palabra latina que significa «hervir». La preparación de la levadura se denomina «fermento».

Hasta el siglo XVII no se descubrió la naturaleza de la levadura. En el año 1680, Van Leeuwenhoek observó por vez primera células de levadura. Para este fin hizo uso de un instrumento que revolucionaría la Biología: el «microscopio». Se basa en el empleo y el enfoque de la luz mediante lentes. Ya hacia el año 1590 se idearon instrumentos que utilizaban combinaciones de lentes («Microscopios compuestos») por un pulidor de lentes, Zacharias Janssen. Los microscopios primitivos fueron en principio de utilidad, pero las lentes estaban tan imperfectamente pulidas que los objetos ampliados aparecían como burbujas cubiertas de pelusa, de estructura inapreciable. Van Leeuwenhoek pulió lentes delgadas, pero perfectas, que aumentaban la imagen hasta 200 veces. Utilizó lentes simples («microscopio simple»).

Con el tiempo se extendió la práctica de utilizar buenas lentes en combinaciones (pues un microscopio compuesto tiene, al menos potencialmente, un mayor poder de resolución que un microscopio simple), y se hizo aún más extenso el mundo de lo muy pequeño.

Un siglo y medio después de Leeuwenhoek, un físico francés, Charles Cagniard de la Tour, usando un buen microscopio estudió los pequeños fragmentos de levadura con la suficiente atención como para observarlos en el proceso de autorreproducción.

Las pequeñas burbujas tenían vida. Más tarde, hacia 1850, la levadura se convirtió en un importante objeto de estudio.

La industria vinícola de Francia atravesaba momentos difíciles. El vino durante el proceso de envejecimiento, se agriaba y no era posible beberlo, con lo cual se perdían millones de francos. El problema fue planteado al joven decano de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Lila en el corazón de la región vinícola. Este joven decano era Louis Pasteur, quien ya había alcanzado cierta fama al ser el primero en separar isómeros ópticos en el laboratorio. Pasteur estudió con el microscopio las células de levadura en el vino. Era evidente para él que dichas células eran de diversos tipos. Todos los vinos que contenían levadura experimentaban fermentación, pero aquellos que se agriaban debían de contener además otro tipo de levadura. A Pasteur le pareció que el vino no se agriaba hasta que finalizaba la fermentación. En este caso, puesto que ya no se precisaba más levadura después de este proceso, ¿por qué no desembarazarse de toda ella en este momento y evitar que la de clase perjudicial creara más trastornos? Sugirió, por tanto, a una industria vinícola horrorizada, que el vino debía ser suavemente calentado después de la fermentación, al objeto de exterminar toda la levadura existente en él. Predijo que el envejecimiento proseguiría seguidamente sin que el vino se agriara. La industria ensayó al fin su afrentosa propuesta, y, para su delicia, halló que efectivamente cesaba de agriarse el vino, mientras su aroma no se alteraba en lo más mínimo por el calentamiento. La industria del vino se había salvado. Por otra parte, el proceso de un suave calentamiento («pasteurización») fue posteriormente aplicado a la leche para matar cualquier germen patógeno presente en ella.

Otros organismos, además de la levadura, aceleran los procesos de degradación. En realidad, en el tracto intestinal tiene lugar un proceso análogo al de la fermentación. El primer hombre en estudiar científicamente la digestión fue el físico francés René-Antoine Ferchault de Réaumur. Utilizando un halcón como animal de experimentación, en el año 1752 le hizo deglutir pequeños tubos metálicos que contenían carne; dichos cilindros protegían a los alimentos de cualquier acción mecánica de molienda, pero, al mismo tiempo, poseían aberturas, cubiertas por una fina malla metálica, para que los procesos químicos del estómago pudieran actuar libremente sobre la carne. Réaumur comprobó que, cuando

el halcón regurgitaba estos tubos, los alimentos aparecían parcialmente disueltos e iban acompañados de un fluido amarillento.

En 1777, el médico escocés Edward Stevens aisló un líquido a partir del estómago («jugo gástrico») y mostró que el proceso disolvente podía tener lugar fuera del organismo, divorciándolo así definitivamente de la influencia directa de la vida.

Evidentemente, los jugos gástricos contenían algo que aceleraba el proceso de desintegración de los alimentos. En 1834, el naturalista alemán Theodor Schwann añadió cloruro mercúrico al jugo de estómago y precipitó un polvo blanco. Después de liberar al polvo del compuesto de mercurio y disolver el residuo obtenido, halló que la solución manifestaba una intensa acción digestiva. Al polvo que habla descubierto lo denominó «pepsina», de la palabra griega que significa «digerir».

Mientras tanto, dos químicos franceses, Anselme Payen y J. F. Persoz, habían hallado en el extracto de malta una sustancia capaz de determinar la conversión del almidón en azúcar más rápidamente de lo que lo podía hacer un ácido. Denominaron a dicha sustancia «diastasa», de una palabra griega que significa «separar», puesto que la habían separado de la malta.

Durante mucho tiempo, los químicos establecieron una clara distinción entre los fermentos vivos, tales como las células de levadura, y los fermentos no vivos o «no organizados», como la pepsina. En el año 1878, el fisiólogo alemán Wilhelm Kühne sugirió que a estos últimos debía de nominárseles «enzimas», a partir de las palabras griegas que significaban «en la levadura», debido a que su actividad era similar a la manifestada por las sustancias catalizadoras en la levadura. Kühne no llegó a presenciar cuán importante, en realidad cuán universal, llegaría a ser el término «enzima».

En 1897, el químico alemán Eduard Buchner, utilizando arena, molió células de levadura, con objeto de romperlas todas, y logró extraer un jugo que podía ejercer la misma actividad fermentativa que aquella desarrollada por las células de levadura originales. Bruscamente se desvaneció la distinción entre fermentos en el interior y en el exterior de las células. Representó otro rudo golpe para la semimística distinción sostenida por los vitalistas entre lo vivo y lo inerte. El término «enzima» fue aplicado desde entonces a todos los fermentos.

Por su descubrimiento, Buchner recibió el premio Nobel de Química de 1907.

Desde entonces fue posible definir una enzima simplemente como un catalizador orgánico. Los químicos iniciaron estudios encaminados a lograr el aislamiento de las enzimas y a precisar qué tipo de sustancias eran realmente. El primer problema que se les planteó fue motivado por el hecho que la cantidad de enzimas en las células y jugos naturales era muy pequeña, y los extractos obtenidos eran, invariablemente, algún tipo de mezclas, siendo en ésas muy difícil deslindar lo que era propiamente una enzima y lo que no lo era.

Muchos bioquímicos sospecharon que las enzimas eran sencillamente proteínas, debido a que sus propiedades enzimáticas podían ser destruidas con facilidad, tal como ocurriría en las proteínas, al ser desnaturalizadas por calentamiento suave. Pero, hacia 1920, el bioquímico alemán Richard Willstätter indicó que ciertas soluciones enzimáticas purificadas, de las que él consideraba había eliminado toda proteína, mostraban marcados efectos catalíticos.

A partir de esto llegó a la conclusión de que las enzimas no eran en realidad proteínas, sino sustancias químicas relativamente sencillas, que podían, además, utilizar una proteína como «molécula transportadora». La mayoría de los bioquímicos siguieron las ideas de Willstätter, que poseía el premio Nobel y gozaba de gran prestigio.

Sin embargo, el bioquímico James Batcheller Sumner, de la Universidad de Cornell, aportó pruebas evidentes en contra de esta teoría, casi al mismo tiempo en que fue dada a conocer. A partir de las semillas blancas de una planta americana tropical, Sumner aisló ciertos cristales que, en solución, mostraban las propiedades de una enzima denominada «ureasa». Esta enzima catalizaba la degradación de la urea en anhídrido carbónico y amoníaco.

Los cristales obtenidos por Sumner mostraban propiedades proteicas definidas, y no consiguió separar la actividad proteica de la enzimática. Todo lo que desnaturalizaba a la proteína también destruía a la enzima. Esto parecía demostrar que lo que había obtenido era una enzima en forma pura y cristalina, y, al mismo tiempo, establecer que la enzima era efectivamente una proteína.
La gran fama de Willstätter restó importancia durante un cierto tiempo al descubrimiento de Sumner. Pero, en 1930, el químico John Howard Northrop y sus colaboradores en el «Instituto Rockefeller» aportaron argumentos irrefutables en favor de los hallazgos de Sumner. Cristalizaron una serie de enzimas, inclusive la pepsina, y comprobaron que todas ellas eran ciertamente proteínas. Además, Northrop mostró que estos cristales eran proteínas muy puras y retenían su actividad catalítica, aún cuando se disolvieran o dividieran hasta un punto tal, que las pruebas químicas ordinarias, como las utilizadas por Willstätter, no pudieran detectar ya la presencia de proteínas.
Así, pues, se estableció definitivamente que las enzimas eran «catalizadores proteicos». Por aquel entonces se había cristalizado ya un centenar de enzimas y todas ellas resultaron sin excepción proteínas.
Por su trabajo, Sumner y Northrop compartieron el premio Nobel de Química de 1946 (con Stanley).
Las enzimas son catalizadores peculiares en dos aspectos: eficacia y especificidad. Por ejemplo, existe una enzima denominada catalasa, que cataliza la transformación del peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno. No obstante, el peróxido de hidrógeno en solución puede descomponerse bajo la acción catalítica de limaduras de hierro o del dióxido de manganeso. Sin embargo, ponderalmente, la catalasa acelera la velocidad de descomposición mucho más de lo que puede hacer cualquier catalizador inorgánico. Cada molécula de catalasa puede descomponer 44.000 moléculas de peróxido de hidrógeno por segundo a 0º C. De esto se desprende que basta una pequeña concentración de enzima para realizar su función.
Por esta misma razón, serán capaces de poner fin a la vida incluso cantidades muy pequeñas de ciertas sustancias («venenos»), en tanto puedan interferir las acciones de una enzima de importancia clave. Los metales pesados, como el mercurio o el bario, administrados en forma de cloruro o nitrato respectivamente, reaccionan con los grupos tiol, esenciales para que muchas enzimas realicen su función. Como consecuencia, la acción de tales enzimas cesa y el organismo resulta envenenado.
Compuestos tales como el cianuro potásico o el ácido cianhídrico hacen entrar a su grupo cianuro (—CN) en combinación con el átomo de hierro de otras enzimas de importancia crucial, y por ello causan rápidamente la muerte, suponemos que de forma indolora, ya que el ácido cianhídrico es el gas utilizado para ejecutar en las cámaras de gas en algunos de los Estados occidentales de los Estados Unidos.
El monóxido de carbono constituye una excepción entre los venenos corrientes. No actúa sobre las enzimas de forma primaria, sino que bloquea la función de la molécula de hemoglobina (ésta una proteína, pero no una enzima), la cual ordinariamente transporta el oxígeno desde los pulmones a las células, pero no puede llevar a cabo esta función cuando el monóxido de carbono se ha fijado en ella. Los animales que no utilizan hemoglobina para el transporte de oxígeno no resultan afectados por el monóxido de carbono.
Las enzimas, como revela el demostrativo ejemplo de la catalasa, son muy específicas; la catalasa descompone únicamente al peróxido de hidrógeno, mientras que los catalizadores inorgánicos, tales como las limaduras de hierro y el dióxido de manganeso, pueden descomponer al peróxido de hidrógeno y, además, catalizar otras muchas reacciones.
¿A qué se debe esta llamativa especificidad de las enzimas? Las teorías de Lunge y Langmuir sobre el papel de intermediario desempeñado por el catalizador sugieren una respuesta. Supongamos que una enzima forma una combinación temporal con el «sustrato»: la sustancia cuya reacción cataliza aquella enzima. La forma, o configuración, de la enzima particular que se

considere puede, por lo tanto, desempeñar un papel muy importante. Realmente, toda enzima debe poseer una superficie muy compleja, pues tiene una serie de diferentes cadenas laterales que emergen de la columna peptídica central. Algunas de estas cadenas laterales tienen una carga negativa, otras una positiva, y aún otras no poseen carga eléctrica alguna. Unas cadenas son de grandes dimensiones, otras en cambio, pequeñas. Puede suponerse que cada enzima posee una superficie que se ajusta especialmente a un sustrato particular. En otras palabras, se adapta al sustrato como una llave lo hace a la cerradura correspondiente. Por lo tanto, se combinará de forma fácil con aquella sustancia, pero sólo difícilmente, o de ninguna manera, con todas las restantes. Esto podría explicar la gran especificidad de las enzimas; cada una de ellas tiene una superficie elaborada con el fin, digamos, de combinarse con un compuesto particular. Si así fuera, no es de maravillar que las proteínas sean formadas con tantas unidades diferentes y sean elaboradas por los tejidos vivos en una variedad tan grande.

Este punto de vista sobre el mecanismo de acción de las enzimas surgió del descubrimiento de que la presencia de una sustancia de estructura similar a la de un sustrato dado podía hacer más lenta e inhibir la reacción del sustrato catalizado por la enzima. El caso mejor conocido es el de una enzima denominada deshidrogenasa del ácido succínico, que cataliza la eliminación de dos átomos de hidrógeno a partir de dicho ácido. Esa reacción no tendrá lugar si se halla presente una sustancia denominada ácido malónico, muy similar al ácido succínico. Las estructuras de ambos ácidos son

ácido succínico   ácido malónico

La única diferencia entre estas dos moléculas es que el ácido succínico tiene un grupo CH_2 más, en el lado izquierdo de la fórmula. Seguramente el ácido malónico, debido a su estructura semejante a la del ácido succínico, puede unirse a la superficie de la enzima. Una vez se encaja en el punto de la superficie donde lo hará el ácido succínico, permanece, digamos, aprisionado allí y entonces la enzima ya no puede ejercer su función. El ácido malónico ha «envenenado» a la enzima, por lo que respecta a su función normal. Este tipo de fenómeno se denomina «inhibición competitiva».

La prueba más positiva en favor de la teoría de la formación de un complejo entre la enzima y el sustrato procede del análisis espectrográfico. Seguramente, cuando una enzima se combina con su sustrato, se produce una modificación de su espectro de absorción: la absorción de la luz por la combinación será diferente de aquella determinada por sólo la enzima o el sustrato. En 1936, los bioquímicos ingleses David Keilin y Thaddeus Mann detectaron una modificación del color de una solución de la enzima peroxidasa, después de la adición de su sustrato, el peróxido de hidrógeno. El biofísico norteamericano Britton Chance efectuó un análisis espectral y descubrió que tenían lugar dos modificaciones progresivas y sucesivas en el espectro de absorción. Atribuyó el primer cambio en el espectrograma a la formación del complejo enzima-sustrato a una cierta velocidad, y el segundo a la descomposición de esta combinación, cuando finaliza la reacción. En 1964, el bioquímico japonés Kunio Yagi comunicó el aislamiento de un complejo enzima-sustrato, constituido por la enzima D-aminoácido-oxidasa levemente unida a la alanina, su sustrato.

Ahora se plantea la cuestión: ¿Es necesaria la totalidad de la molécula de enzima: para la catálisis, o bastará sólo una parte de ella? Ésta es una cuestión importante, tanto desde el punto de vista práctico, como desde el teórico. Hoy en día las enzimas se utilizan cada vez más ampliamente; se las ha empleado para la fabricación de fármacos, ácido cítrico y otras muchas sustancias químicas. Si la totalidad de la molécula de enzima no es necesaria y un

pequeño fragmento de la misma fuera suficiente para desempeñar su función, quizás esta porción activa podría ser sintetizada, de tal modo que el proceso no dependería ya del empleo de células vivas, tales como las levaduras, hongos y bacterias.
Se han hecho algunos progresos prometedores en este sentido. Por ejemplo, Northrop descubrió que cuando se añadían algunos grupos acetilo (CH_3CO) a las cadenas laterales del aminoácido tirosina en la molécula de pepsina, la enzima perdía parte de su actividad. Sin embargo, ésta se conservaba cuando los grupos cetilo se adicionaban a las cadenas laterales de lisina en la pepsina. Por lo tanto debía contribuir a la actividad manifestada por la pepsina, mientras que, evidentemente, la lisina no lo hacía. Éste fue el primer indicio de que una enzima podía poseer porciones no esenciales para su actividad.
Recientemente se ha determinado con mayor precisión la «región activa» de una enzima digestiva. Se trata de la enzima llamada quimiotripsina. El páncreas la segrega primeramente en una forma inactiva, el denominado «quimiotripsinógeno». Esta molécula inactiva se convierte en la activa por escisión de un único enlace peptídico (que es efectuada por la enzima digestiva tripsina). Es decir, parece como si la puesta al descubierto de un simple aminoácido proporcionara a la quimiotripsina su actividad. Ahora se sabe que la adición de una molécula de DFF (diisopropílfluorofosfato) a la quimiotripsina inactiva a esta enzima. Seguramente el DFF se une al aminoácido de importancia clave. Gracias al marcado con el DFF, aquel aminoácido ha sido identificado como la serina. En realidad, también se ha observado que el DFF se une a la serina de otras enzimas digestivas. En todos los casos la serina se halla en la misma posición de una secuencia de cuatro aminoácidos: glicina-ácido aspártico-serina-glicina.
Es indudable que un péptido constituido únicamente por esos cuatro aminoácidos no manifestará su actividad catalítica. De alguna manera, el resto de una molécula de enzima también desempeña cierto papel. Podemos suponer que esta secuencia de cuatro aminoácidos —el centro activo— es análogo al borde cortante de un cuchillo, que, no obstante, no puede utilizarse sin el correspondiente mango.
El centro activo, o borde cortante, no debe ser necesariamente un elemento único en la cadena de aminoácidos. Consideremos la enzima ribonucleasa. Ahora que se conoce el orden exacto en que se hallan dispuestos sus 124 aminoácidos, ha sido posible idear métodos para sustituir éste o aquel aminoácido en la cadena y apreciar el efecto del cambio sobre la acción de la enzima. Se ha descubierto que tres aminoácidos en particular son necesarios para el desarrollo de su acción, pero que éstos se hallan ampliamente separados. Dichos aminoácidos son una histidina en la posición 12, una lisina en la posición 41 y otra histidina en la posición 119. Por supuesto, esta separación existe sólo en la cadena considerada como una cinta extendida. En la molécula operante, la cadena se muestra arrollada adoptando una configuración tridimensional específica, mantenida por cuatro moléculas de cistina, que se extienden como puentes entre los segmentos curvados de la cadena. En dicha molécula, los tres aminoácidos necesarios se hallan próximos entre sí, formando una unidad íntimamente entrelazada. Se especificó más todavía la cuestión del centro activo en el caso de la lisocima, una enzima presente en muchos lugares incluidas las lágrimas y la mucosidad nasal. Provoca la disolución de las células bacterianas, catalizando la descomposición de los eslabones básicos en algunas sustancias que componen la pared celular bacteriana. Es como si ocasionara el resquebrajamiento de esa pared y dejara escapar el contenido de las células.
La lisocima fue la primera enzima cuya estructura se sometió a un análisis completo (1965) en las tres dimensiones. Se descubrió el eslabón básico entre un átomo de oxígeno en la cadena ramificada del ácido glutámico (posición # 35) y otro átomo de oxígeno en la cadena ramificada del ácido aspártico (posición # 52). Se conjuraron ambas posiciones mediante el pliegue de la cadena de ácido amínico con la separación suficiente entre ambas para el alojamiento de la molécula que se debería atacar. En tales circunstancias podía tener lugar fácilmente la reacción química

necesaria para romper el eslabón. Ésta es la forma específica que permite trabajar ordenadamente a la lisocima.

Por otra parte, algunas veces ocurre también que el borde cortante de la molécula enzimática no es en absoluto un grupo de aminoácidos, sino una combinación atómica de naturaleza totalmente distinta. Más adelante se mencionarán algunos ejemplos.

No podemos jugar con este borde cortante, pero ¿podríamos modificar el mango del cuchillo sin afectar la eficacia de la herramienta? La existencia de variedades distintas, por ejemplo, de una proteína como la insulina, nos permite considerar que sí podemos hacerlo. La insulina es una hormona, no una enzima, pero su función es muy específica. En una cierta posición de la cadena G de la insulina existe una secuencia de 3 aminoácidos, que es distinta en los diferentes animales. En el ganado vacuno es la alanina-serina-valina; en el cerdo, treoninaserina-isoleucina; en las ovejas, alanina-glicina-valina; en los caballos, treonina-glicina-isoleucina; y así sucesivamente. Cualquiera de estas insulinas puede ser sustituida por cualquier otra y realizar todavía la misma función.

Aún es más; una molécula proteica puede en ocasiones ser fragmentada de modo drástico sin que resulte afectada seriamente su actividad (de la misma manera como el mango de un cuchillo o el de un hacha pueden acortarse sin que su eficacia se vea considerablemente reducida). Un ejemplo de esto lo constituye la hormona denominada ACTH (hormona adrenocorticotrópica). Esta hormona es una cadena peptídica constituida por 39 aminoácidos, cuyo orden de sucesión ha sido ahora plenamente determinado. Pueden eliminarse hasta 15 de los aminoácidos a partir del extremo C-terminal sin destruir la actividad de la hormona. Por otra parte, la eliminación de uno o dos aminoácidos del extremo N-terminal (por así decirlo el borde cortante) inactiva la molécula.

Lo mismo se ha hecho con una enzima denominada «papaína», procedente de los frutos y la savia del árbol papaya. Su acción enzimática es similar a la de la pepsina. La supresión de 80 de los 180 aminoácidos de la molécula de papaína a partir del extremo N-terminal no reduce su actividad en grado apreciable.

Así, pues, puede al menos concebirse que las enzimas podrían simplificarse hasta un punto tal que su síntesis fuera factible. Las enzimas sintéticas, en la forma de compuestos orgánicos bastante simples, podrían obtenerse entonces a gran escala, utilizándolas para distintos fines.

Ésta podría ser una forma de «miniaturización química».

Metabolismo

Un organismo tal como el cuerpo humano es una fábrica de productos químicos de gran diversidad. Respira oxígeno y bebe agua. Incorpora como alimentos hidratos de carbono, grasas, proteínas, sustancias minerales y otras materias primas. Elimina diversos materiales no digeribles, así como bacterias y los productos de la putrefacción que producen. También excreta anhídrido carbónico a través de los pulmones, elimina agua por dichos órganos y las glándulas sudoríparas, y expele orina, que transporta una serie de compuestos en solución, el principal de los cuales es la urea. Estas reacciones químicas determinan el metabolismo del organismo.

Examinando las materias primas que penetran en el organismo y los productos de desecho, podremos decir unas cuantas cosas acerca de lo que ocurre en el interior del organismo. Por ejemplo, puesto que las proteínas aportan la mayor parte del nitrógeno que penetra en el organismo, sabemos que la urea (NH_2CONH_2) debe ser un producto del metabolismo de las proteínas. Pero entre las proteínas y la urea existe una larga, tortuosa y complicada senda a recorrer. Cada enzima del organismo cataliza sólo una reacción específica, consistente quizás en la simple redisposición de 2 ó 3 átomos. Cada conversión importante en el organismo implica el paso a través de una multitud de fases y la participación de muchas enzimas.

Incluso un organismo aparentemente simple, tal como la diminuta bacteria, debe hacer uso de muchos miles de enzimas y reacciones distintas.
Todo esto podría parecer innecesariamente complejo, pero en realidad es la misma esencia de la vida. La vasta complejidad de reacciones en los tejidos puede ser controlada delicadamente aumentando o reduciendo la producción de las enzimas apropiadas. Las enzimas controlan la química del organismo, al igual que los intrincados movimientos de los dedos sobre las cuerdas controlan la música de un violín, y, sin esta complejidad, el organismo no podría llevar a cabo sus múltiples funciones.
Seguir el curso de las miríadas de reacciones que constituyen el metabolismo del organismo es seguir los trazos que perfilan la vida. El intentar precisarlo con detalle, dar sentido al entrelazamiento de las incontables reacciones que se producen simultáneamente, puede sin duda parecer una tarea formidable o incluso quimérica. Formidable, sin duda, lo es, pero no irremisiblemente condenada al fracaso.
El estudio por los químicos del metabolismo se inició modestamente con un esfuerzo por descubrir cómo las células de levadura convertían el azúcar en alcohol etílico. En el año 1905, dos químicos británicos, Arthur Harden y W. J. Young, sugirieron que este proceso implicaba la formación de azúcares que poseían grupos fosfatos. Fueron los primeros en apreciar que el fósforo desempeñaba un papel importante (y, desde entonces, el fósforo ha adquirido una importancia cada vez mayor). Harden y Young hallaron incluso en los tejidos vivos un éster azúcar-fosfato que consistía del azúcar fructosa con dos grupos fosfato (PO_3H_2). Este «fructosa difosfato» (algunas veces denominado aún «éster de Harden-Young») fue el primer «intermediario metabólico» identificado con precisión, es decir, el primer compuesto del cual se reconocía que era formado momentáneamente en el proceso que discurría desde los compuestos ingeridos por el organismo hasta los compuestos eliminados por él. Harden y Young establecieron de este modo las bases del estudio del «metabolismo intermediario», que intenta precisar la naturaleza de tales productos intermediarios y las reacciones en las cuales se hallan implicados. Por este trabajo, y por sus ulteriores investigaciones sobre las enzimas que participan en la conversión del azúcar en alcohol por la levadura (véase capítulo XIV), Harden compartió el premio Nobel de Química de 1929 (con Euler-Chelpin).
Lo que en un principio era considerado peculiar de la célula de levadura adquirió más tarde una gran trascendencia, cuando el químico alemán Otto Fritz Meyerhof demostró, en 1918, que células animales tales como las musculares, metabolizaban el azúcar casi de la misma manera como lo hacía la levadura. La diferencia primordial consistía en que, en las células animales, la degradación no proseguía hasta un estadio tan avanzado de esta vía particular del metabolismo. En vez de convertir a la molécula de glucosa, con sus 6 átomos de carbono, en el alcohol etílico, de 2 átomos de carbono (CH_3CH_2OH), sólo la metabolizaban hasta dar lugar a la sustancia con 3 átomos de carbono denominada ácido láctico ($CH_3CHOHCOOH$).
Los trabajos de Meyerhof vertieron por vez primera cierta luz sobre el principio general que desde entonces ha sido aceptado de forma unánime: que, con pequeñas diferencias, el metabolismo sigue las mismas vías en todas las criaturas, desde la más simple a la más compleja.
Por sus estudios sobre el ácido láctico en el músculo, Meyerhof compartió el premio Nobel de Fisiología y Medicina de 1922 con el fisiólogo inglés Archibald Vivian Hill. Este último había estudiado el músculo desde el punto de vista de su producción de calor, llegando a conclusiones muy similares a las obtenidas por Meyerhof mediante su resolución química del problema.
Los detalles de las fases individuales implicadas en la transformación de la glucosa en el ácido láctico fueron dilucidadas entre los años 1937 y 1941 por Carl Ferdinand Cori y su esposa Gerty Theresa Cori, que trabajaban en la Universidad Washington de San Luis. Utilizaron extractos de tejidos y enzimas purificadas, al objeto de provocar modificaciones en diversos ésteres azúcar-fosfato, y luego intentaron ensamblar todas estas reacciones parciales cual si se tratara de un rompecabezas. El esquema de las

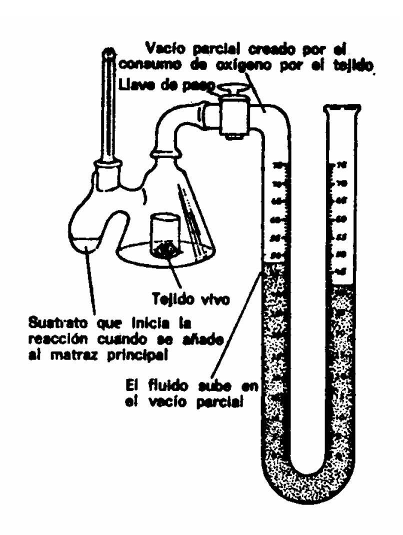
reacciones concatenadas que presentaron se ha conservado, con pequeñas modificaciones, hasta la actualidad, y los Cori compartieron (con Houssay) el premio Nobel de Fisiología y Medicina de 1947.
En la vía del azúcar al ácido láctico se produce una cierta cantidad de energía que es utilizada por las células. La célula de levadura vive de ella cuando fermenta al azúcar, y así lo hace también, cuando es necesario la célula muscular. Es importante recordar que esta energía se obtiene sin la participación del oxígeno del aire. Así, un músculo es capaz de trabajar, aún cuando deba gastar más energía de la que puede ser remplazada por las reacciones que implican la utilización del oxígeno llegado hasta él en una proporción relativamente baja, a través de la sangre. Sin embargo, cuando el ácido láctico se acumula, el músculo se fatiga y debe descansar hasta que el oxígeno haya degradado el ácido láctico.
Seguidamente se plantea la pregunta: ¿De qué forma es proporcionada a las células la energía procedente de la degradación metabólica del azúcar en ácido láctico, y cómo la utilizan? El químico norteamericano, de origen alemán, Fritz Albert Lipmann halló una respuesta merced a las investigaciones iniciadas en 1941. Mostró que ciertos compuestos de fosfato, formados en el curso del metabolismo de los hidratos de carbono, acumulan cantidades considerables de energía en el enlace que conecta al grupo fosfato con el resto de la molécula. Este «enlace fosfato de alta energía» es transferido a transportadores de energía presentes en todas las células. El más conocido de estos transportadores es el «trifosfato de adenosina» TFA, o con su sigla internacional ATP. La molécula de TFA y ciertos compuestos similares representan las monedas de escaso valor en el activo energético de la economía. Acumulan la energía en bonos rápidamente negociables, netos y de conveniente cuantía. Cuando el enlace fosfato es hidrolizado, la energía disponible puede convertirse en energía química para la formación de proteínas a partir de los aminoácidos, en energía eléctrica para la transmisión de un impulso nervioso, o en energía cinética mediante la contracción del músculo, etc. Aunque la cantidad de TFA en el organismo es pequeña en cualquier momento dado, siempre existe la suficiente (mientras dura la vida), pues tan pronto como las moléculas de TFA son utilizadas, se forman otras nuevas.
Por su crucial descubrimiento, Lipmann compartió el premio Nobel de Fisiología y Medicina del año 1953 (con Krebs).
El organismo de los mamíferos no puede convertir el ácido láctico en alcohol etílico (como lo hace la levadura), en cambio, a través de otra vía metabólica salva la etapa que representa el alcohol etílico y degrada al ácido láctico en anhídrido carbónico (CO_2) y agua. Para lograr este objetivo consume oxígeno y produce una gran cantidad de energía, mucho mayor que la generada por la conversión anaeróbica (es decir, sin la participación del oxígeno) de la glucosa en el ácido láctico.
El hecho que el consumo de oxígeno se halle implicado ofrece un medio conveniente para seguir el curso del proceso metabólico; es decir, para hallar qué productos intermediarios se crean a lo largo de esta vía metabólica. Supongamos que en una etapa dada de una secuencia de reacciones se sospecha que una cierta sustancia (por ejemplo el ácido succínico) es el sustrato intermediario. Podremos mezclar a este sustrato con tejido (o, en muchos casos, con una única enzima) y medir la velocidad con que consume oxígeno. Si muestra una rápida incorporación de oxígeno, tendremos la certeza que esta sustancia particular puede participar en el proceso.
El bioquímico alemán Otto Heinrich Warburg ideó el instrumento idóneo para medir la proporción en que es incorporado el oxígeno. El denominado «manómetro de Warburg» consiste en un pequeño matraz (donde se mezclan el sustrato de tejido o la enzima) conectado a un extremo de un delgado tubo en forma de U, mientras que el otro extremo del tubo está abierto. Un líquido coloreado llena la parte inferior del tubo en U. Puesto que la mezcla de la enzima y el sustrato absorbe oxígeno a partir del aire en el matraz, se produce un ligero vacío en él y el líquido coloreado en el tubo asciende por la rama conectada con el matraz. La proporción en que asciende la columna de líquido puede

utilizarse para calcular la intensidad de la incorporación de oxígeno.
Las experiencias de Warburg sobre el consumo de oxígeno por los tejidos le valieron el premio Nobel de Fisiología y Medicina del año 1931.
Warburg y otro bioquímico alemán, Heinrich Wieland, identificaron las reacciones que producen energía durante la degradación del ácido láctico. En el curso de la serie de reacciones, pares de átomos de hidrógeno son eliminados de las sustancias intermediarias mediante enzimas denominadas «deshidrogenasas». Estos átomos de hidrógeno se combinan luego con el oxígeno, con la ayuda catalítica de las enzimas llamadas «citrocromos». A finales de la década 1920-1930, Warburg y Wieland adoptaron posiciones contrapuestas sobre cuál de estas reacciones era la más importante, sosteniendo Warburg que la de mayor importancia era la de incorporación del oxígeno, y Wieland que era la de la eliminación del hidrógeno. David Keilin demostró que ambas fases eran igualmente esenciales.
El bioquímico alemán Hans Adolf Krebs inició la tarea de dilucidar la secuencia completa de reacciones y productos intermediarios, desde el ácido láctico, hasta el anhídrido carbónico y el agua. Éste es el denominado ciclo de Krebs, o ciclo del ácido cítrico, siendo éste uno de los productos de importancia crucial formados en este ciclo.
Por este logro, que fue finalmente obtenido en 1940, Krebs compartió junto con Lipmann, el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1953.
El ciclo Krebs produce el mayor porcentaje de energía, como si dijéramos la parte del león, en los organismos que requieren oxígeno molecular para la respiración (lo cual significa todos los organismos salvo algunos tipos de bacterias anaeróbicas cuya adquisición de energía estriba en reacciones químicas no relacionadas con el oxígeno). En diferentes puntos del ciclo Krebs un compuesto perderá dos átomos de hidrógeno que se combinarán a su debido tiempo con el oxígeno para formar agua. Tras la expresión «a su debido tiempo» se ocultan muchos pormenores. Los dos átomos de hidrógeno circulan por muy diversas moléculas citocrómicas hasta que la última, la «oxidasa citocrómica» lo pasa al oxígeno molecular. A lo largo de esa cadena de citrocromos se forman las moléculas de TFA que abastecen al cuerpo con su «modesta» energía química.
Recapitulando: por cada giro del ciclo Krebs se forman dieciocho moléculas de TFA. No se sabe con exactitud dónde ni cómo se forma la TFA en la cadena. Puesto que todo el proceso requiere oxígeno y acumulación de grupos fosfáticos para formar la TFA, se ha estimado conveniente denominarlo «fosforización oxidásica»; ésta es una reacción básica en los tejidos del ser vivo. Cualquier interferencia seria en su funcionamiento (tal como la ingestión de cianuro potásico) ocasiona la muerte al cabo de pocos minutos.
Los diminutos corpúsculos dentro del citoplasma contienen todas las sustancias y enzimas participantes en la fosforización oxidásica. Las detectó por primera vez en 1898 el biólogo alemán C. Benda, quien —como es natural— no percibió su alcance por aquellas fechas. Él las llamó «mitocondrios» (tomándolas erróneamente por «filamentos de cartílago») y el nombre perduró.
El mitocondrio usual parece por su forma, un balón de rugby con 1/25.000 centímetros de longitud y 1/62.500 centímetros de grosor. Una célula mediana puede contener entre varios centenares y un millar de mitocondrios. Las células excepcionalmente grandes contienen unos doscientos mil, mientras que las bacterias anaeróbicas no contienen ninguno. Después de la Segunda Guerra Mundial, la investigación con microscopio electrónico mostró que el mitocondrio tenía una estructura enormemente compleja para su minúsculo tamaño; poseía una doble membrana cuya parte externa era lisa, mientras que la interna ofrecía una gran superficie de laberínticas arrugas. En esta superficie interna del mitocondrio se alojaban varios millares de exiguas estructuras denominadas «partículas elementales». Y eran ellas las que parecían representar el verdadero laboratorio de la fosforización oxidásica.
Mientras tanto, los bioquímicos habían obtenido algunos progresos en la resolución del problema que representaba el

metabolismo de las grasas. Se sabía que las moléculas de las grasas eran cadenas de átomos de carbono que podían ser hidrolizadas en «ácidos grasos» (en la mayor parte de los casos cadenas de 16 a 18 átomos de carbono dispuestos sucesivamente), y que las moléculas se fragmentaban cada vez en elementos de 2 átomos de carbono. En 1947, Fritz Lipmann descubrió un compuesto bastante complejo que desempeñaba un papel importante en la «acetilación», es decir, la transferencia de un fragmento de 2 átomos de carbono de un compuesto a otro. Denominó al compuesto «coenzima A» (la A procede del término de acetilación). Tres años más tarde, el bioquímico alemán Feodor Lynen halló que la coenzima A se hallaba íntimamente implicada en el metabolismo de las grasas. Una vez unida a un ácido graso, seguía una secuencia de 4 etapas que terminaban en el desprendimiento de un fragmento de dos átomos de carbono del extremo de la cadena a la que se hallaba unida la coenzima. Luego, otra molécula de coenzima A se unía a lo que se había separado del ácido graso, se perdían otros dos átomos de carbono más, y así sucesivamente. Éste es el denominado «ciclo de oxidación de los ácidos grasos». Por éste y otros trabajos de investigación, Lynen compartió el premio Nobel de Fisiología y Medicina de 1964.

La degradación de las proteínas evidentemente debe ser, en general, más compleja que aquellas de los hidratos de carbono o las grasas, debido a que se hallan implicados unos 20 aminoácidos diferentes. En algunos casos parece ser bastante simple: una pequeña modificación en un aminoácido puede convertirlo en un compuesto capaz de incorporarse al ciclo del ácido cítrico al igual que pueden hacerlo los fragmentos de 2 átomos de carbono procedentes de los ácidos grasos. Pero la mayor parte de los aminoácidos son descompuestos siguiendo vías complejas.

Podemos ahora referirnos de nuevo a la conversión de las proteínas en urea: la cuestión que consideramos al principio. Esta conversión parece ser comparativamente simple.



Manómetro de Warburg.

Un grupo de átomos, que es esencialmente la molécula de urea, forma parte de una cadena lateral del aminoácido arginina. Este grupo puede ser separado por una enzima denominada «arginasa» y deja como resto un tipo de aminoácido truncado, denominado «ornitina». En 1932, Krebs y un colaborador, K. Henseleit, mientras estudiaban la formación de la urea por el tejido hepático de la rata, descubrieron que, cuando añadían arginina al tejido, se producía un considerable aumento en el contenido de urea, en realidad mucha más urea de la que podía haber producido la escisión de cada molécula de arginina que añadieron. Krebs y Henseleit, decidieron que las moléculas de arginina debían actuar como agentes que producían urea de forma reiterada. En otras palabras, cuando una molécula de arginina resulta desprovista de su fragmento ureico por la arginasa, la ornitina que se forma obtiene grupos amina a partir de otros aminoácidos (así como también anhídrido carbónico a partir del organismo) y forma de nuevo arginina. Así, la molécula de arginina se escinde repetidamente, vuelve a formarse, se escinde otra vez, y así de forma sucesiva, dando lugar en cada ocasión a una molécula de

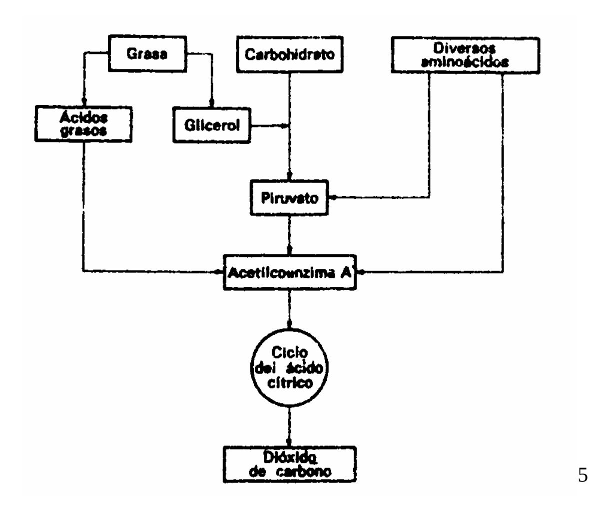
urea. Éste es denominado «ciclo de la urea», «ciclo de la ornitina» o el «ciclo de Krebs-Henseleit».

Después de la eliminación de nitrógeno, a través de la arginina, los restantes «esqueletos de carbono» de los aminoácidos pueden ser degradados, a través de diversas rutas, en anhídrido carbónico y agua, con producción de energía.

Trazadores

Las investigaciones del metabolismo mediante todos estos artificios mantenían aún a los bioquímicos en la posición de estar viendo lo que ocurría, por así decirlo «desde la barrera». Podían elaborar ciclos generales, pero, para hallar qué era lo que realmente estaba teniendo lugar en el animal vivo, necesitaban algún sistema trazador que les permitiera seguir con detalle el curso de los acontecimientos a través de los estadios del metabolismo; es decir, precisar el destino de las moléculas individuales allí donde se hallaran. Realmente, las técnicas que lo hacían posible se descubrieron a principios de este siglo, pero los químicos comenzaron a emplearlas más bien lentamente en todas sus posibilidades.

El primer pionero en este campo fue el bioquímico alemán Franz Knoop. En 1904 concibió la idea de administrar a perros, con los alimentos, moléculas grasas marcadas para ver cuál era el destino de dichas moléculas. Las marcó uniéndoles un anillo de benceno a un extremo de la cadena; hizo uso del anillo de benceno debido a que los mamíferos no poseen enzimas que puedan metabolizarlo. Knoop esperaba que lo que el anillo de benceno llevara con él, cuando apareciera en la orina, podría decirle algo acerca de cómo la molécula de grasa había sido metabolizada por el organismo, y estaba en lo cierto. El anillo de benceno invariablemente aparecía unido a una cadena lateral de dos átomos de carbono. De esto dedujo que el organismo separaba en cada ocasión de la molécula de grasa fragmentos de dos átomos de carbono. (Como hemos visto, 40 años más tarde, los trabajos realizados con la coenzima A confirmaron su deducción.) Las cadenas de átomos de carbono de las grasas más frecuentes contienen todas ellas un número par de átomos de carbono. ¿Qué ocurriría si se utilizara una grasa cuya cadena poseyera un número impar de átomos de carbono? En este caso, si los átomos fueran separados de la cadena de dos en dos, el producto final resultante estaría formado por el anillo de benceno con un átomo de carbono unido a él. Knoop administró a perros este tipo de molécula grasa y, por supuesto, obtuvo dicho resultado.



[5]

Knoop había empleado el primer «trazador» en Bioquímica. En 1913, el químico húngaro Georg von Hevesy y su colaborador, el químico alemán Friedrich Adolf Paneth, hallaron otra forma de marcar a las moléculas: mediante isótopos radiactivos. Comenzaron con el plomo radiactivo, y su primer experimento bioquímico fue medir cuánto plomo, en la forma de una solución de sal de este metal, podía incorporar una planta. La cantidad era realmente demasiado pequeña para ser medida con cualesquiera de los métodos químicos entonces disponibles, pero, utilizando el

[5] El esquema completo del metabolismo de carbohidratos, grasas y proteínas.

plomo radiactivo, podía medirse fácilmente, debido a su radiactividad. Hevesy y Paneth alimentaron a plantas con la solución de la sal de plomo marcada radiactivamente, y, a intervalos periódicos, calcinaron una planta y midieron la radiactividad de sus cenizas. De esta manera fueron capaces de determinar la proporción en que el plomo era absorbido por las células de la planta.

Pero el anillo de benceno y el plomo eran sustancias muy poco «fisiológicas» para ser utilizadas como trazadoras. Con facilidad podían modificar la química normal de las células vivas. Sería mucho mejor emplear como trazadores a átomos que tomaran parte en el metabolismo ordinario del organismo: tales como los átomos de oxígeno, nitrógeno, carbono, hidrógeno, fósforo.

Una vez los Joliot-Curie hubieron demostrado, en 1934, la radiactividad artificial, Hevesy siguió en esta dirección y comenzó utilizando fosfatos que contenían fósforo radiactivo. Con ellos midió la incorporación del fosfato en las plantas.

Desgraciadamente, los isótopos radiactivos de algunos de los elementos de importancia crucial en los tejidos vivos —especialmente el nitrógeno y el oxígeno— no son utilizables debido a que tienen una vida muy corta, siendo su vida media de sólo unos pocos minutos, a lo sumo. Pero la mayor parte de los elementos más importantes poseen isótopos estables que pueden ser utilizados como trazadores. Estos isótopos son el carbono 13, el nitrógeno 15, el oxígeno 18 y el hidrógeno 2. Comúnmente existen en cantidades muy pequeñas (alrededor del 1 % o menos); en consecuencia, «enriqueciendo» el hidrógeno natural en hidrógeno 2, por ejemplo, podrá utilizarse como trazador de una molécula que contenga hidrógeno administrada al organismo. La presencia del hidrógeno pesado en cualquier compuesto puede ser detectada mediante el espectrógrafo de masas, que lo separa en virtud de su mayor peso. De este modo puede seguirse a través del organismo el destino del hidrógeno marcado.

El hidrógeno, en realidad, fue el primer trazador fisiológico. Se dispuso de él para este fin cuando Harold Urey aisló el hidrógeno 2 (deuterio) en 1931. Uno de los primeros hechos dilucidados con el uso del deuterio como trazador fue que los átomos de hidrógeno en el organismo se hallaban mucho menos fijados a sus compuestos de lo que se había creído. Se puso de relieve que eran liberados y transferidos de un compuesto a otro, intercambiando posiciones entre los átomos de oxígeno de las moléculas de azúcar, en las moléculas de agua, etc. Ya que un átomo de hidrógeno ordinario no puede ser distinguido de otro, este intercambio no pudo ser detectado antes de que los átomos de deuterio lo descubrieran.

Lo que el hallazgo implicaba era que los átomos de hidrógeno iban de un lado a otro del organismo, y, si los átomos del deuterio se unían al oxígeno, podrían difundir a través del organismo, independientemente de que experimentaran una transformación química global, los compuestos implicados, o, por el contrario no lo hicieran. En consecuencia, el investigador tenía que estar seguro de que un átomo de deuterio, hallado en un compuesto, había llegado allí por alguna reacción definida, catalizada por una enzima determinada, y no simplemente por un proceso de salto o intercambio. Por fortuna, los átomos de hidrógeno unidos al carbono no se intercambian, de tal manera que el deuterio hallado a lo largo de las cadenas de carbono adquiere una significación metabólica.

Los hábitos errantes de los átomos fueron destacados en primer plano en 1937, cuando el bioquímico norteamericano, de origen alemán, Rudolf Schoenheimer y sus colegas empezaron a utilizar el nitrógeno 15. Alimentaron a ratas con aminoácidos marcados con nitrógeno 15, las sacrificaron después de un cierto período de tiempo, y analizaron los tejidos para ver qué compuestos contenían el nitrógeno 15. De nuevo aquí se observó que, poco después de que un aminoácido marcado hubiera penetrado en el organismo, casi todos los aminoácidos contenían nitrógeno 15. En 1942, Schoenheimer publicó un libro titulado *The Dynamic State of Body Constituents* (El estado dinámico de los constituyentes en el organismo). El título describe la nueva perspectiva que los isótopos trazadores han permitido adoptar en Bioquímica. Casi al

margen de los cambios químicos aparentes, se produce un tráfico incesante de átomos.

Poco a poco el empleo de trazadores ha aportado multitud de detalles relativos a las vías metabólicas. Corrobora el esquema general de procesos tales como el metabolismo del azúcar, el ciclo del ácido cítrico y el ciclo de la urea. Ha permitido descubrir nuevos intermediarios, establecer vías alternativas de reacción, etc.

Cuando, gracias al reactor nuclear, pudo disponerse en cantidad de más de 100 diferentes isótopos radiactivos, después de la Segunda Guerra Mundial, los trabajos con trazadores experimentaron un enorme impulso. Compuestos ordinarios podían ser bombardeados con neutrones en un reactor y aparecer cargados con isótopos radiactivos. Casi todos los laboratorios de Bioquímica en los Estados Unidos (y podría decirse que en todo el mundo, pues, poco después, los Estados Unidos pusieron a disposición de otros países isótopos para fines científicos) iniciaron programas de investigación en los que se utilizaban trazadores radiactivos.

A los trazadores estables se sumaron entonces el hidrógeno radiactivo (tritio), el fósforo radiactivo (fósforo 32), el azufre radiactivo (azufre 35), el potasio radiactivo (potasio 42), sodio radiactivo, yodo radiactivo, hierro radiactivo, cobre radiactivo y, el más importante de todos ellos, el carbono radiactivo (carbono 14). El carbono 14 fue descubierto en 1940 por los químicos estadounidenses Martin D. Kamen y Samuel Ruben, y, para su sorpresa, tenía una vida media de más de 5.000 años, insospechadamente larga para un isótopo radiactivo de un elemento ligero.

El carbono 14 permitió resolver problemas que habían desafiado a los químicos durante años, y en los cuales no habían logrado, al parecer, ningún progreso. Una de las cuestiones de la cual esbozó una respuesta fue la relativa a la producción de la sustancia conocida como «colesterol». La fórmula del colesterol, elaborada después de muchos años de penosa investigación por hombres tales como Wieland (que recibió el premio Nobel de Química de 1927 por su trabajo sobre compuestos relacionados con el colesterol), ha resultado ser:

Todavía no se comprende completamente la función del colesterol en el organismo, pero, sin lugar a dudas, esta sustancia posee una importancia capital. El colesterol se encuentra en grandes cantidades en las vainas de naturaleza grasa que rodean a los nervios, en las glándulas suprarrenales, y en combinación con ciertas proteínas. Un exceso de esta sustancia puede determinar cálculos biliares y arteriosclerosis. Lo más importante de todo es que el colesterol constituye el prototipo de la familia de los «esteroides», siendo el núcleo esteroideo la combinación de los cuatro anillos que se pueden apreciar en la fórmula. Los esteroides son un grupo de sustancias sólidas, similares a las grasas, que incluye a las hormonas sexuales y a las hormonas corticosuprarrenales. Todas ellas son formadas, sin lugar a duda, a partir del colesterol. Pero, ¿cómo es sintetizado, a su vez, el colesterol en el organismo? Hasta que los trazadores vinieron en su ayuda, los bioquímicos no tenían ni la más remota idea sobre este particular. Los primeros en abordar la cuestión con un trazador fueron Rudolf Schoenheimer y su colaborador David Rittenberg. Administraron agua pesada a ratas y hallaron que el deuterio aparecía incorporado a las moléculas de colesterol. Esto, en sí mismo, no tiene importancia alguna, debido a que el deuterio podría haber llegado a dicha molécula por simples intercambios. Pero, en 1942 (después de que Schoenheimer se suicidara trágicamente), Rittenberg y otro colaborador, el bioquímico

germano-americano Konrad Emil Bloch, descubrieron un hecho más definido. Alimentaron a las ratas con el ion acetato (un simple grupo de dos átomos de carbono, CH_3COO—) marcado con el trazador deuterio unido al átomo de carbono del grupo CH_3. De nuevo se apreció que el deuterio se había incorporado a las moléculas de colesterol, y esta vez no podía haber llegado a él por intercambio; tenía que haber sido incorporado a la molécula como parte del grupo CH_3, Los grupos de dos átomos de carbono (de los cuales el ion acetato es una versión) parecen representar encrucijadas generales del metabolismo. Tales grupos, por lo tanto, pueden muy bien servir de almacén de material para constituir el colesterol. Pero, ¿cómo llegan a formar la molécula?

En 1950, cuando se dispuso del carbono 14, Bloch repitió la experiencia, esta vez marcando cada uno de los 2 átomos de carbono del ion acetato con un trazador diferente. Marcó el carbono del grupo CH_3 con el isótopo estable carbono 13 y el carbono del grupo COO— con el carbono radiactivo 14. Luego, después de administrar el compuesto a ratas, analizó su colesterol y vio en qué puntos de la molécula se hallaban los dos carbonos marcados. El análisis era una tarea que requería una verdadera y delicada maestría en química, y Bloch junto con una serie de experimentadores trabajaron en el durante años, identificando el origen de cada uno de los átomos de carbono del colesterol. De estos estudios parecía desprenderse que los grupos acetato probablemente formaban al principio una sustancia denominada «escualeno», un compuesto con 30 átomos de carbono, muy escaso en el organismo, sobre el que nadie había pensado dedicarle antes verdadera atención. Entonces aparecía como estación intermedia en la vía que conducía al colesterol, y, por ello, los bioquímicos empezaron a estudiarlo con gran interés. Por sus investigaciones, Bloch compartió con Lynen el premio Nobel de Fisiología y Medicina de 1964.

Aproximadamente de la misma manera a como dilucidaron la síntesis del colesterol, los bioquímicos han logrado establecer la estructura del anillo porfirínico del heme, que constituye el armazón básico de la hemoglobina y de muchas enzimas. David Shemin, de la Universidad de Columbia, alimentó a patos con el aminoácido glicina, marcado de diversas maneras. La glicina (NH_2CH_2COOH) tiene dos átomos de carbono. Cuando marcó el carbono CH_2 con carbono 14, dicho carbono aparecía en la porfirina obtenida a partir de la sangre de los patos. Sin embargo, cuando marcó el carbono COOH, el trazador radiactivo no aparecía en la porfirina. En resumen, el grupo CH_2 participaba en la síntesis de la porfirina, pero no, en cambio, el grupo COOH.

Shemin, trabajando con Rittenberg, descubrió que la incorporación a la porfirina de los átomos de la glicina podía tener lugar igualmente en los eritrocitos en el tubo de ensayo que en los animales vivos. Esto simplificaba la cuestión, dando resultados fácilmente valorables, y evitaba el sacrificio de animales o la inconveniencia que podían representar éstos. Marcó el nitrógeno de la glicina con nitrógeno 15 y su carbono CH_2 con el carbono 14, luego mezcló la glicina con la sangre de pato. Más tarde, separó cuidadosamente la porfirina producida y halló que los 4 átomos de nitrógeno en la molécula de porfirina procedían de la glicina. Lo mismo ocurría con el átomo de carbono adyacente en cada uno de los cuatro pequeños anillos pirrólicos (véase la fórmula, en la página 15), así como también con los 4 átomos de carbono que hacían de puentes entre los anillos pirrólicos. Esto arrojaba una diferencia de 12 átomos de carbono en el anillo de porfirina y de 14 en las diversas cadenas laterales. Se observó que éstos procedían del ion acetato, algunos a partir del carbono del CH_3 y otros a partir del carbono del COO—. De la distribución de los átomos trazadores fue posible deducir la manera como el acetato y la glicina eran incorporados a la porfirina. Primero formaban un único pirrólico; luego, dos de tales anillos se combinaban, y, finalmente, dos combinaciones de dos anillos se unían para formar la estructura porfirínica de cuatro anillos.

En 1952 fue aislado un compuesto denominado «porfobilinógeno» en forma pura, como resultado de una línea independiente de investigación, por el químico inglés R. G. Westall. Este compuesto aparecía en la orina de personas con defectos en el metabolismo de la porfirina, de tal modo que se sospechó que

tenía algo que ver con las porfirinas. Su estructura resultó ser casi idéntica a aquélla de un solo anillo pirrólico que Shemin y sus colaboradores habían postulado como una de las fases previas en la síntesis de la porfirina. El porfobilinógeno representaba un estadio crucial en esta vía metabólica.

Seguidamente se demostró que el ácido «delta-aminolevulínico», una sustancia de estructura similar a la de la molécula del porfobilinógeno escindida por la mitad, podía aportar todos los átomos necesarios para su incorporación en el anillo porfirínico por las células sanguíneas. La conclusión más plausible es que las células forman primero el ácido delta-aminolevulínico a partir de la glicina y el acetato (eliminando, en el proceso, el grupo COOH de glicina como dióxido de carbono), que dos moléculas del ácido delta-aminolevulínico se combinan luego para formar porfobilinógeno (un único anillo pirrólico), y para este último, a su vez, se combina formando primero un anillo con dos pirroles y, finalmente, la estructura con cuatro anillos pirrólicos de la porfirina.

Fotosíntesis

De todos los triunfos de la investigación con trazadores, quizás el mayor ha sido haber dilucidado la compleja serie de fases que conducen al desarrollo de las plantas verdes, de las que depende toda la vida en este planeta.

El reino animal no podría existir si los animales sólo pudieran comerse los unos a los otros, de la misma manera que una comunidad de personas tampoco podría enriquecerse si solamente se apoderaran de sus mutuas ganancias, ni tampoco un hombre podría sostenerse a sí mismo apretándose el cinturón. Un león que se come a una cebra o un hombre que ingiere un bisté están consumiendo una sustancia preciosa, que se obtuvo con grandes esfuerzos y considerable atrición por parte del mundo vegetal. La segunda ley de la termodinámica nos dice que, en cada fase del ciclo, se está perdiendo algo. Ningún animal almacena la totalidad de los hidratos de carbono, grasas y proteínas contenidas en los alimentos que come, ni puede hacer uso de toda la energía disponible en los alimentos. Inevitablemente una gran parte, por no decir la mayor parte, de la energía es disipada en forma de calor no utilizable. En cada nivel de la ingestión de alimentos se está perdiendo algo de energía química. Así, si todos los animales fueran exclusivamente carnívoros, la totalidad del reino animal moriría en muy pocas generaciones. Más bien diremos que nunca habría llegado a ocupar el primer plano.

El hecho afortunado es que la mayor parte de los animales son herbívoros. Se alimentan de la hierba de los campos, de las hojas de los árboles, de semillas, nueces y frutas, o de las algas y células vegetales verdes microscópicas que en cantidades ingentes se hallan en las capas superficiales de los océanos. Tan sólo una minoría de animales pueden permitirse el lujo de ser carnívoros.

Por lo que respecta a las propias plantas, éstas no se hallarían en mejores condiciones, si no les fuera cedida la energía necesaria desde una fuente externa. Elaboran hidratos de carbono, grasas y proteínas a partir de moléculas sencillas, tales como anhídrido carbónico y agua. Esta síntesis presupone una aportación de energía, y las plantas la obtienen a partir de la fuente de energía más abundante posible: la luz solar. Las plantas verdes convierten la energía de la luz solar en la energía química de los compuestos complejos, y ésta hace posible todas las formas de vida (excepto la de ciertas bacterias). Esto fue claramente indicado en 1845 por el físico alemán Julius Robert von Mayer, uno de los primeros en abogar por la ley de la conservación de la energía, y que, por lo tanto, conocía particularmente bien el problema del equilibrio energético. El proceso por el cual las plantas verdes hacen uso de la luz solar se denomina «fotosíntesis», derivado de las palabras griegas que significan «sintetizar por la luz».

El primer intento de una investigación científica del crecimiento de las plantas fue realizado ya a principios del siglo XVII por el químico flamenco Jan Baptista van Helmont. Hizo crecer un pequeño sauce en un recipiente que contenía una cierta cantidad, escrupulosamente pesada, de tierra, y halló, ante la sorpresa general, que aunque el árbol crecía, el peso de la tierra se mantenía

invariable. Se había considerado hasta entonces como un hecho indudable que las plantas obtenían las sustancias constitutivas a partir del suelo. (Realmente las plantas toman del suelo algunos minerales e iones, pero no en una cantidad fácilmente ponderable.) Si no la obtienen de él. ¿de dónde la consiguen? Van Helmont decidió que las plantas debían elaborar sus sustancias constituyentes a partir del agua, con la que él había regado abundantemente la tierra. Sólo en parte estaba en lo cierto.
Un siglo más tarde, el fisiólogo inglés Stephen Hales mostró que las plantas formaban sus propias sustancias constituyentes en gran medida a partir de un material más etéreo que el agua, a saber, el aire. Medio siglo después, el médico holandés Jan Ingen-Housz identificó el ingrediente nutritivo en el aire como el anhídrido carbónico. También demostró que una planta no absorbe el anhídrido carbónico en la oscuridad; precisa de la luz (la «foto» de la palabra fotosíntesis). Entretanto Priestley, el descubridor del oxígeno, demostraba que las plantas verdes liberaban oxígeno, y, en 1804, el químico suizo Nicholas Théodore de Saussure demostró que el agua era incorporada a los tejidos vegetales, tal como había sugerido Van Helmont.
La siguiente contribución de importancia tuvo lugar en los años 1850-1860, cuando el ingeniero de minas francés Jean-Baptiste Boussingault hizo crecer plantas en un suelo totalmente libre de materia orgánica. De esta manera demostró que las plantas podían obtener su carbono a partir únicamente del anhídrido carbónico atmosférico. Por otra parte, las plantas no conseguían crecer en un terreno exento de compuestos nitrogenados, y esto demostraba que obtenían su nitrógeno a partir del suelo y que no utilizaban el atmosférico (salvo en el caso de ciertas bacterias). Desde la época de Boussingault se hizo patente que la participación del suelo como alimento directo para las plantas se limitaba a ciertas sales inorgánicas, tales como ciertos nitratos y fosfatos. Eran estos ingredientes lo que los fertilizantes orgánicos (tales como el estiércol) añadían al terreno. Los químicos comenzaron a defender el empleo de fertilizantes químicos, que servían excelentemente para este fin y que eliminaban los desagradables olores así como reducían los peligros de infección y enfermedad, en gran parte derivados de los estercoleros.
De este modo pudo establecerse el esqueleto del proceso de la fotosíntesis. En presencia de la luz solar, una planta toma el anhídrido carbónico y lo combina con agua, para formar sus tejidos, liberando oxígeno en el proceso. Por lo tanto, es evidente que las plantas verdes no sólo proporcionan alimentos, sino que además renuevan las existencias de oxígeno en la Tierra. Si no fuera por ello, en cosa de unos siglos, el contenido de oxígeno en la atmósfera descendería hasta un nivel mínimo, y el aire contendría tanto anhídrido carbónico que asfixiaría la vida animal.
Es enorme la escala a la que las plantas verdes de la tierra crean materia orgánica y liberan oxígeno. El bioquímico ruso-estadounidense Eugene I. Rabinovich, uno de los más importantes investigadores de la fotosíntesis, estima que cada año las plantas verdes de la tierra combinan un total de 150 mil millones de toneladas de carbono (a partir del anhídrido carbónico) con 25 mil millones de toneladas de hidrógeno (a partir del agua), y liberan 400 mil millones de toneladas de oxígeno. En esta gigantesca producción, las plantas de los bosques y campos de la tierra firme sólo contribuyen en un 10 %; el restante 90 % debemos agradecerlo a las plantas unicelulares y algas marinas de los océanos.
Ahora bien, aún seguimos conociendo únicamente el esqueleto del proceso. ¿Cuáles son sus detalles? En 1817, Pierre-Joseph Pelletier y Joseph-Bienaimé Caventou, de Francia, que más tarde serían los descubridores de la quinina, cafeína, estricnina y algunos otros productos vegetales especializados, aislaron el más importante producto vegetal de todos: el único que da el color verde a las plantas verdes. Denominaron al compuesto «clorofila», de las palabras griegas que significan «hoja verde». Luego, en 1865, el botánico alemán Julius von Sachs mostró que la clorofila no se hallaba distribuida de forma general en las células vegetales (aún cuando las hojas aparecen uniformemente verdes), sino que se hallaba localizada en pequeños cuerpos subcelulares, llamados más tarde «cloroplastos».

Se hizo evidente que la fotosíntesis tenía lugar dentro del cloroplasto y que la clorofila era esencial para ese proceso. Sin embargo, la clorofila no bastó. Aunque se la extrajera meticulosamente, ella no podía catalizar por sí sola la reacción fotosintética en un tubo de ensayo.

Por lo general, el cloroplasto es bastante mayor que el mitocondrio. Algunas plantas unicelulares poseen solamente un gran cloroplasto como célula. Ahora bien, casi todas las células vegetales contienen muchos cloroplastos pequeños, y cada uno es dos o tres veces más largo y grueso que el típico mitocondrio.

La estructura del cloroplasto parece ser todavía más compleja que la del mitocondrio. Su interior está compuesto por muchas membranas sutiles que se extienden de una pared a otra. Éstas son las *Lamellae*. En casi todos los tipos de cloroplasto, esas *Lamellae* engruesan y se oscurecen por sectores para producir «grana» y es precisamente dentro de la grana donde se encuentran las moléculas clorofílicas.

Si observamos las *Lamellae* dentro de la grana con el microscopio electrónico, veremos que ellas parecen a su vez estar formadas por diminutas unidades apenas visibles que semejan los mosaicos de un cuarto de baño. Cada uno de esos objetos puede ser una unidad fotosintetizadora conteniendo entre 250 y 300 moléculas clorofílicas.

Es más difícil aislar y mantener intacto al cloroplasto que al mitocondrio. Por fin, en 1954, el bioquímico norteamericano de origen polaco Daniel I. Arnon, trabajando con células disociadas de espinaca, logró extraer totalmente intactos los cloroplastos y llevar a cabo la reacción fotosintética completa. El cloroplasto no contiene solamente clorofila, sino también un complemento de enzimas y sustancias asociadas, todas ellas dispuestas en un esquema preciso e intrincado. Contiene incluso citocromos donde la energía de la luz solar captada por la clorofila puede convertirse en TFA mediante la fosforización oxidásica. Pero, ¿qué decir entretanto sobre la estructura de la clorofila, la sustancia más característica de los cloroplastos? Durante décadas, los químicos atacaron esta sustancia de crucial importancia con todas las herramientas de que disponían, pero sólo lentamente se hizo la luz. Por último, en 1906,. Richard Willstätter, de Alemania (que redescubrió la cromatografía e insistió incorrectamente en que las enzimas no eran proteínas) identificó un componente central de la molécula de clorofila. Era el metal magnesio, (Willstätter recibió el premio Nobel de Química en 1915 por su descubrimiento y otros trabajos sobre los pigmentos vegetales.) Willstätter y Hans Fischer iniciaron sus trabajos sobre la estructura de la molécula —labor que sólo se completó en una generación—. Hacia los años treinta habían determinado que la clorofila tenía una estructura anular porfirínica básicamente similar a aquella del heme (una molécula que Fischer había descifrado). Donde el heme tenía un átomo de hierro en el centro del anillo porfirínico, la clorofila tenía un átomo de magnesio.

Si había alguna duda al respecto, ésta fue desterrada por R. B. Woodward. Aquel maestro de la síntesis, que había sintetizado la quinina en 1945, la estricnina en 1947 y el colesterol en 1951, coronó por fin sus anteriores logros sintetizando una molécula, en 1960, que era idéntica a la fórmula elaborada por Willstätter y Fischer, y que, además, tenía todas las propiedades de la clorofila aislada de las hojas verdes.

Exactamente, ¿qué reacción cataliza en la planta la clorofila? Todo lo que se sabía hacia los años treinta era que el anhídrido carbónico y el agua penetraban en la planta y el oxígeno entonces salía de ella. La investigación se hizo más difícil debido al hecho de que la clorofila aislada no podía lograr la realización de la fotosíntesis. Sólo las células vegetales intactas, o, en el mejor de los casos, los cloroplastos intactos, podían hacerlo, lo que significaba que el sistema en estudio era muy complejo.

Como una primera hipótesis, los bioquímicos supusieron que las células vegetales sintetizaban glucosa ($C_4H_{12}O_6$) a partir del anhídrido carbónico y el agua, y luego elaboraban, a partir de ésta, las diversas sustancias vegetales, añadiendo nitrógeno, azufre, fósforo, y otros elementos inorgánicos procedentes del suelo.

Sobre el papel parecía como si la glucosa pudiera ser formada en una serie de fases, combinándose en la primera el átomo de

carbono del anhídrido carbónico con el agua (liberando los átomos de oxígeno del CO_2), y luego polimerizándose la combinación, CH_2O (formaldehído) en glucosa. Seis moléculas de formaldehído darían lugar a una molécula de glucosa.

Esta síntesis de la glucosa a partir del formaldehído pudo ser realizada en el laboratorio de una forma muy tediosa. Seguramente la planta posee enzimas que aceleran las reacciones. En realidad, el formadehído es un compuesto muy venenoso, pero los químicos supusieron que era transformado en glucosa tan rápidamente que en ningún momento la planta contenía más de una cantidad muy pequeña de él. Esta teoría del formaldehído, propuesta por vez primera en 1870 por Baeyer (que sintetizó el índigo), se mantuvo durante dos generaciones, simplemente debido a que no había otra mejor que pudiera sustituirla.

En 1938 surgió un nuevo enfoque del problema, cuando Ruben y Kamen iniciaron la tarea de dilucidar la química de las plantas verdes con trazadores. Mediante el uso del oxígeno 18, el poco común isótopo estable del oxígeno, hicieron un hallazgo importante. Se apreció que, cuando el agua dada a una planta estaba marcada con oxígeno 18, el oxígeno liberado por la planta contenía este trazador, pero éste no era el caso cuando era marcado sólo el anhídrido carbónico proporcionado a la planta. En resumen, el experimento mostró que el oxígeno liberado por las plantas procedía de la molécula de agua y no de la molécula de anhídrido carbónico, como erróneamente se había supuesto en la teoría del formaldehído.

Ruben y sus colaboradores intentaron seguir el destino de los átomos de carbono en la planta, marcando el anhídrido carbónico con el isótopo radiactivo carbono 11 (el único carbono radiactivo conocido en aquel tiempo). Pero este intento falló. Por este motivo: el carbono 11 tiene una vida media de sólo 20,5 minutos. Por otra parte, no disponían de un método, en aquel entonces, que les permitiera separar compuestos individuales en la célula vegetal con rapidez y de forma total.

Pero, hacia 1940, se obtuvieron las herramientas necesarias: Ruben y Kamen descubrieron el carbono 14, el isótopo radiactivo de vida larga, que hizo posible seguir el destino del carbono a través de una serie de reacciones perezosas, y el desarrollo de la cromatografía sobre papel proporcionó un medio de separar mezclas complejas con facilidad y limpiamente. (En realidad, los isótopos radiactivos permitieron un claro refinamiento de la cromatografía sobre papel: Las manchas radiactivas sobre papel, que representaban la presencia del trazador, producían señales oscuras sobre una película fotográfica colocada debajo de aquél, de tal modo que el cromatograma daba lugar a su propia fotografía; esta técnica fue denominada «autorradiografía».)

Después de la Segunda Guerra Mundial, otro grupo, dirigido por el bioquímico norteamericano Melvin Calvin, recogió el desafío. Durante breves períodos de tiempo expusieron plantas unicelulares microscópicas *(Chlorella)* al anhídrido carbónico que contenía carbono 14, permitiendo así que la fotosíntesis se desarrollara sólo a lo largo de sus primeros estadios. Luego trituraron las células vegetales, separaron sus sustancias por cromatografía e hicieron una autorradiografía. Descubrieron que, aún cuando las células habían sido expuestas al anhídrido carbónico marcado durante sólo un minuto y medio, los átomos de carbono radiactivo aparecían en 15 sustancias distintas de la célula. Por reducción del tiempo de exposición, disminuyeron el número de sustancias en las que se había incorporado el carbono radiactivo y llegaron a la conclusión que el primero o casi el primer compuesto en el cual la célula incorporaba el carbono del anhídrido carbónico era el «gliceril-fosfato». (En ningún caso detectaron la presencia de formaldehído, de tal modo que la venerable teoría del formaldehído pasó, sin más estridencias, a la Historia.) El gliceril-fosfato es un compuesto con 3 átomos de carbono. Evidentemente, tenía que ser formado por una vía indirecta, pues no pudo hallarse un precursor de 1 ó 2 átomos de carbono. Se localizaron otros dos compuestos, conteniendo fosfato, que incorporaban carbono marcado al cabo de un período de tiempo muy corto. Ambos eran variedades: El «ribulosa-difosfato» (un compuesto con 5 átomos de carbono) y el «sedoheptulosa fosfato» (un compuesto con 7 átomos de carbono).

Los investigadores identificaron las enzimas que catalizaron las reacciones en las que intervenían tales azúcares, estudiaron estas reacciones y elaboraron las vías metabólicas seguidas por la molécula de anhídrido carbónico. El esquema que mejor satisface sus hallazgos es el siguiente.

Primero el anhídrido carbónico se adiciona a la ribulosa-difosfato de 5 átomos de carbono, produciendo un compuesto con 6 átomos de carbono. Éste seguidamente se escinde en dos, dando lugar al gliceril-fosfato de 3 átomos de carbono. Una serie de reacciones, en las que participa la sedoheptulosa fosfato y otros compuestos, unen luego a dos gliceril-fosfato para formar el glucosa-fosfato con 6 átomos de carbono. Entretanto, el ribulosa-difosfato se regenera y está en disposición de incorporar otra molécula de anhídrido carbónico. Se pueden imaginar seis de tales ciclos operando a la vez. Cada vez que se completa un ciclo, cada uno de ellos aporta un átomo de carbono (a partir de anhídrido carbónico) y, a partir de éstos, se forma una molécula de glucosa-fosfato. Después de completarse un nuevo ciclo en los seis ciclos se produce otra molécula de glucosa-fosfato, y así sucesivamente.

Desde un punto de vista energético esto es la inversa del ciclo del ácido cítrico. Mientras que el ciclo del ácido cítrico convierte los fragmentos de la degradación de los hidratos de carbono en anhídrido carbónico, el ciclo de la ribulosa-fosfato elabora hidratos de carbono a partir del anhídrido carbónico. El ciclo del ácido cítrico libera energías que utilizará el organismo; el ciclo de la ribulosadifosfato, inversamente, tiene que consumir energía.

Con esto están de acuerdo los primeros resultados de Ruben y Kamen. La energía de la luz solar se utiliza, gracias a la acción catalítica de la clorofila, para escindir una molécula de agua en hidrógeno y oxígeno, un proceso denominado «fotólisis» (de las palabras griegas que significan «lisis por la luz»). Esta es la forma como la energía radiante de la luz solar es convertida en energía química, pues las moléculas de hidrógeno y oxígeno contienen mas energía química que la molécula de agua de la que proceden. De no ser así, se requeriría una gran cantidad de energía para escindir moléculas de agua en hidrógeno: por ejemplo, calentando el agua hasta aproximadamente 2.000 grados, o haciendo pasar a su través una corriente eléctrica de gran intensidad. Pero la clorofila realiza esta función fácilmente a temperaturas ordinarias. Todo lo que requiere es la energía, relativamente débil, de la luz visible. La planta utiliza la energía luminosa de la que absorbe, por lo menos, el 30 %; algunos investigadores creen que el rendimiento puede llegar a ser del 100 % en condiciones ideales. Si el hombre pudiera obtener energía tan eficazmente como lo hacen las plantas, sus preocupaciones sobre sus suministros energéticos y de alimentos serían mucho menores.

Una vez se han escindido las moléculas de agua, la mitad de los átomos de hidrógeno se incorporan al ciclo de la ribulosa-difosfato, y la mitad de los átomos de oxígeno son liberados al aire. El resto de los átomos de hidrógeno y oxígeno se combinan de nuevo para formar agua. Al hacer esto, liberan el exceso de energía que se les cedió, cuando la luz solar escindió las moléculas de agua, y esta energía es transferida a los compuestos de fosfato de alta energía, tales como TFA. La energía almacenada en estos compuestos se utiliza luego para mantener en funcionamiento el ciclo de la ribulosa-difosfato. Por su trabajo de elucidación de las reacciones implicadas en la fotosíntesis, Calvin recibió el premio Nobel de Química de 1961.

En realidad existen algunas otras formas de vida que obtienen energía sin utilizar la clorofila. Hacia el año 1880 se descubrieron las «bacterias quimiosintéticas»; estas bacterias incorporan el anhídrido carbónico en la oscuridad y no liberan oxígeno. Algunas oxidan compuestos de azufre para obtener energía; otras oxidan compuestos de hierro, y algunas la obtienen a través de otros procedimientos químicos.

Pero, además, también existen bacterias que contienen compuestos similares a la clorofila («bacterioclorofila»), que les permite convertir el anhídrido carbónico en compuestos orgánicos a expensas de la energía de la luz; incluso en algunos casos en el infrarrojo próximo, donde ordinariamente la clorofila no actuaría. Sin embargo, sólo la propia clorofila puede lograr la escisión del agua y la conservación de la gran acumulación de energía así

obtenida; la bacterioclorofila debe hacerlo con recursos energéticos menores.
Todos los métodos de obtención de energía fundamental, distintos de los que utilizan la luz solar a través de la clorofila, son esencialmente vías muertas, y ninguna criatura más complicada que una bacteria ha hecho satisfactorio uso de ellos. Para las restantes formas de vida (e incluso para la mayor parte de las bacterias), la clorofila y la fotosíntesis son, directa o indirectamente, la base de la vida.

XII. LA CÉLULA

Cromosomas

Constituye una verdadera paradoja el hecho que, hasta tiempos recientes, el hombre conociera muy poco acerca de su propio organismo. En realidad, únicamente hace unos 300 años que aprendió algo sobre la circulación de la sangre, y tan sólo en el curso de, aproximadamente, los últimos 50 años ha conseguido descubrir las funciones de muchos de sus órganos.
El hombre prehistórico, al trocear los animales para cocinarlos y al embalsamar los restos humanos preparándolos para la vida futura, tuvo conocimiento de la existencia de los grandes órganos tales como el cerebro, el hígado, el corazón, los pulmones, el estómago, los intestinos y los riñones. Este conocimiento fue aumentado debido al frecuente uso de la observación de los diversos órganos internos del animal sacrificado con fines rituales (particularmente su hígado), para prever el futuro o estimar el grado con que la divinidad daba su beneplácito o desaprobaba una determinada cuestión. Papiros egipcios que tratan de forma correcta sobre las técnicas quirúrgicas y presuponen una cierta familiarización con la estructura del organismo, datan ya de unos 2.000 años a. de J.C.
Los antiguos griegos llegaron a disecar animales y, en ocasiones, cadáveres humanos, con el propósito de aprender algo acerca de la «anatomía» (de las palabras griegas que significan «seccionar»). Se consiguieron incluso algunos trabajos delicados. Alcmaeón de Crotón, aproximadamente unos 500 años a. de J.C., describió por vez primera el nervio óptico y la trompa de Eustaquio. Dos siglos mas tarde, en Alejandría, Egipto (entonces el centro mundial de la Ciencia), se inició brillantemente una escuela de anatomía griega con Herófilo y su discípulo Erasístrato. Investigaron las partes del cerebro, distinguiendo entre éste y el cerebelo, y estudiaron asimismo los nervios y vasos sanguíneos.
La Anatomía antigua alcanzó su nivel más alto con Galeno, médico de origen griego que practicó en Roma en la segunda mitad del siglo II. Galeno elaboró ciertas teorías sobre las funciones del organismo, que fueron aceptadas como un evangelio durante los siguientes 1.500 años. Sin embargo, sus nociones sobre el cuerpo humano estaban llenas de curiosos errores. Esto es comprensible, ya que los antiguos obtenían la mayor parte de su información de la disección de animales; inhibiciones de diversa índole les impedían la disección del cuerpo humano.
En sus denuncias de los griegos paganos, los primeros escritores cristianos los acusaban de haber practicado estas disecciones de seres humanos. Pero esto son cosas que sólo se hallan en la literatura polémica; no sólo es dudoso que los griegos hicieran múltiples disecciones humanas, sino que, evidentemente, no disecaron siquiera suficientes cuerpos muertos para aprender gran cosa sobre la anatomía humana. En cualquier caso, la desaprobación por la Iglesia de la disección puso virtualmente punto final a los estudios anatómicos durante toda la Edad Media.
Cuando este período de la historia llegaba a su fin, la Anatomía comenzó a revivir en Italia. En 1316, un anatomista italiano, Mondino de Luzzi, escribió el primer libro dedicado enteramente a la Anatomía, y por ello es conocido como el «restaurador de la Anatomía».
El interés en el arte naturalista durante el Renacimiento promovió también la investigación anatómica. En el siglo XV, Leonardo da Vinci efectuó algunas disecciones mediante las que reveló nuevos aspectos de la Anatomía, pintándolos con el propio genio del artista. Mostró la doble curvatura de la columna vertebral y los senos que horadan los huesos de la cara y la frente. Usó sus

estudios para elaborar teorías fisiológicas mucho más avanzadas que las de Galeno. Pero Leonardo, aunque fue tanto un genio de la ciencia como del arte, tuvo poca influencia sobre el pensamiento científico de su época. Bien sea por rechazo neurótico, o por simple precaución, no publicó ninguno de sus trabajos científicos, ocultándolos en libros de notas, escritos en clave. Correspondió a generaciones posteriores, cuando sus libros de notas fueron finalmente publicados, descubrir sus logros científicos.

El médico francés Jean Fernel fue el primer científico moderno en adoptar la disección como una parte importante de sus deberes de médico. Publicó un libro sobre este tema en 1542. Sin embargo, su labor pasó casi totalmente inadvertida debido a un trabajo mucho más importante publicado el año siguiente. Éste fue la famosa *De Humani Corporis Fabrica* («Concerniente a la estructura del cuerpo humano») de Andreas Vesalio, un flamenco que realizó la mayor parte de su obra en Italia. Basándose en la teoría de que el verdadero estudio de la Humanidad comenzaba con el hombre, Vesalio disecó el sujeto apropiado y corrigió muchos de los errores de Galeno. Los dibujos de Anatomía humana de su libro (que se cree fueron realizados por Jan Stevenzoon van Calcar, un discípulo del artista Tiziano) son tan maravillosos y exactos que todavía se publican hoy en día y siempre serán considerados como clásicos. Vesalio puede en conciencia ser llamado el padre de la Anatomía moderna. Su *Fabrica* fue tan revolucionaria en su campo como en el suyo lo fue el *De Revolutionibus Orbium Coelestium* de Copérnico, publicado en el mismo año.

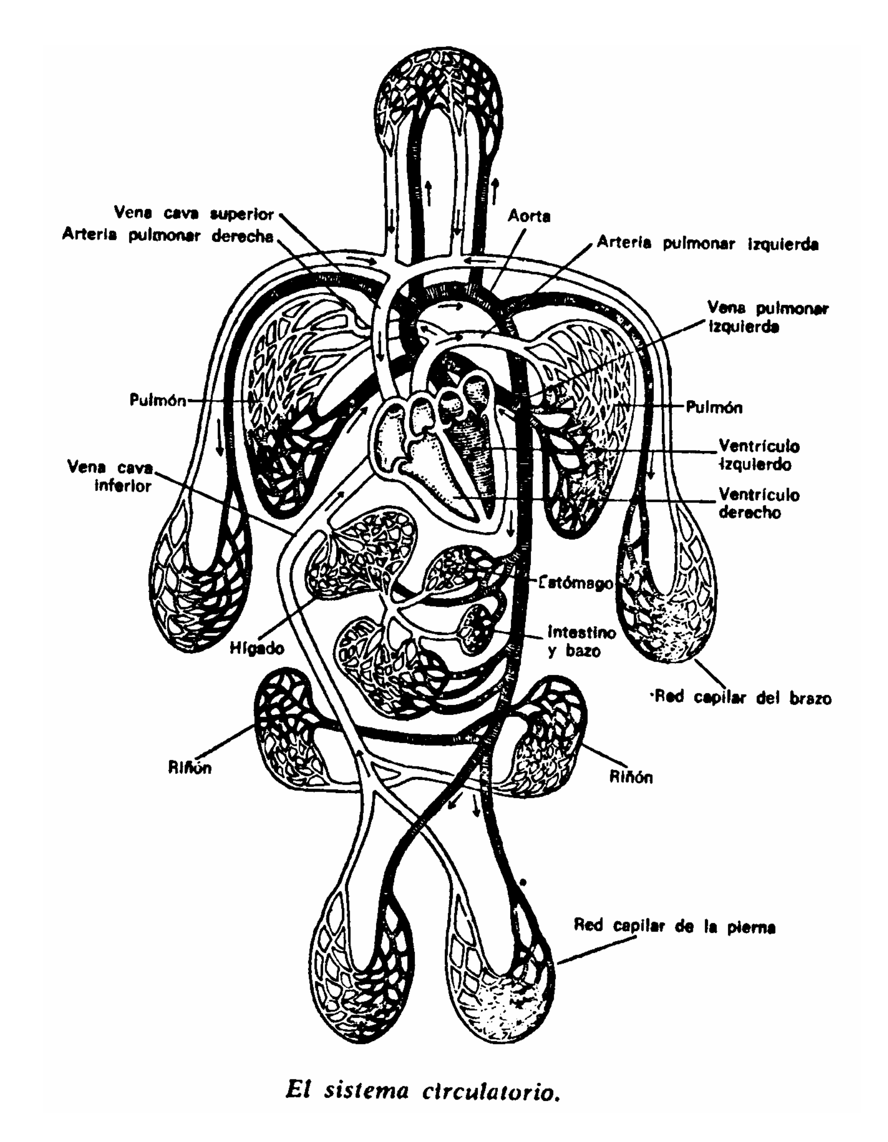
Del mismo modo que la revolución iniciada por Copérnico fructificó en Galileo, aquí también la iniciada por Vesalio alcanzó la cumbre en los descubrimientos cruciales de William Harvey. Harvey era un médico y experimentador inglés, de la misma generación de Galileo y William Gilbert, el investigador del magnetismo. Se interesó particularmente por el líquido orgánico vital: la sangre. ¿Qué hacía ésta en el organismo?

Se sabía que existían dos clases de vasos sanguíneos: las venas y las arterias. (Praxágoras de Coso un médico griego del siglo III a. de J.C., había dado a las últimas el nombre de «arterias» a partir de las palabras griegas que significan «yo transporto aire», debido a que halló que estos vasos estaban vacíos en los cuerpos muertos. Más tarde, Galeno demostró que, durante la vida del organismo, estos vasos transportaban la sangre.) También se sabía que la contracción del corazón impulsaba a la sangre, pues, cuando se cortaba una arteria, podía observarse cómo la sangre salía a un ritmo sincronizado con el latido cardíaco.

Galeno había afirmado que la sangre seguía un curso de ida y vuelta en los vasos sanguíneos; primero corría en una dirección a través del cuerpo y luego en la otra. Esta teoría le obligó a explicar por qué los movimientos de ida y retorno no eran bloqueados por la pared entre las dos mitades del corazón; a esta cuestión Galeno respondió simplemente que la pared debía de poseer unos pequeños orificios, invisibles, que permitían el paso de la sangre a su través.

Harvey inició un estudio más detallado del corazón. Descubrió que cada mitad se hallaba dividida en dos cámaras, separadas entre sí por una válvula unidireccional que permitía a la sangre fluir desde la cámara superior («aurícula») a la inferior («ventrículo»), pero no en sentido contrario. En otras palabras, la sangre que penetraba en una de las aurículas podía ser bombeada a su correspondiente ventrículo y, desde allí, hacía los vasos sanguíneos que partían de él, pero en ningún caso podían fluir en el sentido opuesto. Posteriormente, Harvey efectuó experiencias sencillas, aunque maravillosamente claras, para determinar la dirección del flujo en los vasos sanguíneos. Ató sucesivamente una arteria y una vena en un animal vivo para observar en qué lado de este bloqueo ascendía la presión dentro del vaso sanguíneo. Descubrió así que, en las arterias, el vaso siempre se hinchaba en el lado correspondiente entre el corazón y el punto bloqueado. Esto significaba que la sangre en las arterias fluía desde el corazón hacia la periferia. Cuando ligaba una vena, la distensión tenía lugar siempre en el otro lado del punto bloqueado: por consiguiente, la sangré fluía en las venas en dirección al corazón. Otro dato que se nos ofrece en favor de este flujo unidireccional en las venas proviene del hecho que, en las de

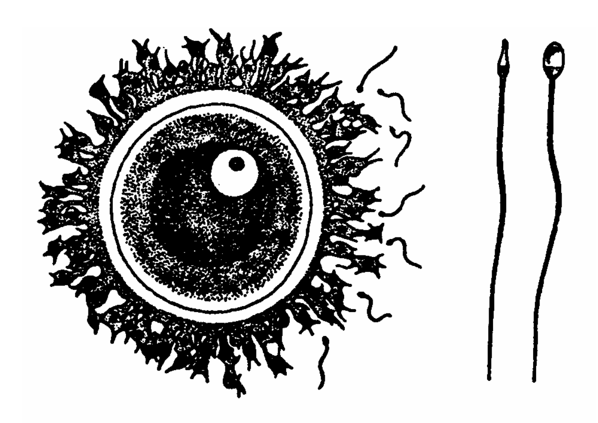
mayor tamaño, existen unas válvulas que impiden que la sangre corra alejándose del corazón. Esto había sido descubierto por el propio maestro de Harvey, el anatomista italiano Hieronymus Fabrizzi (mejor conocido por su nombre latinizado, Fabricius). Sin embargo, Fabricius, bajo la carga de la tradición galénica, no se atrevió a deducir de sus experimentos la inevitable conclusión, cediendo por ello la gloria a su discípulo inglés.



El sistema circulatorio.

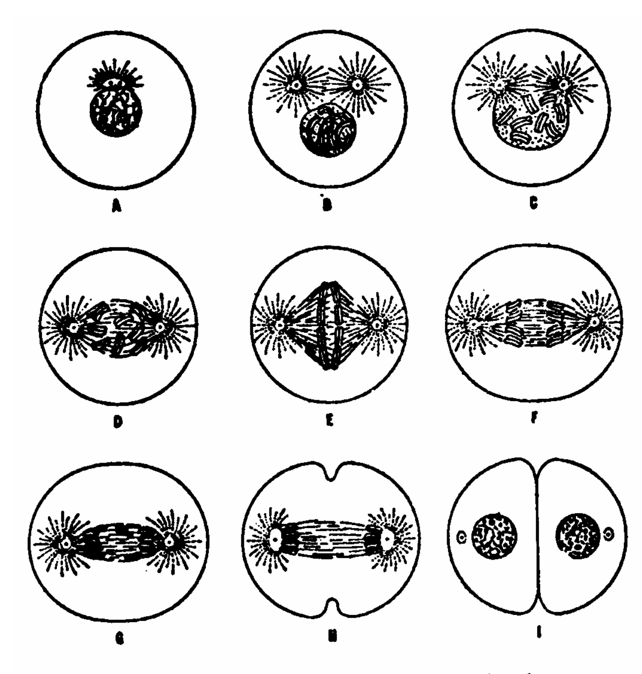
Harvey seguidamente efectuó mediciones cuantitativas del flujo sanguíneo (quizá la primera vez que alguien aplicaba las matemáticas a un problema biológico). Sus mediciones demostraron que el corazón bombeaba la sangre a una velocidad tal que, en 20 minutos, su volumen expulsado era igual a la

cantidad total de fluido contenida en el organismo. No parecía razonable suponer que el cuerpo fabricara nueva sangre, ni consumiera la antigua, a tal velocidad. La conclusión lógica, por lo tanto, era que la sangre debía de circular a través del organismo. Ya que fluía alejándose del corazón en las arterias y dirigiéndose hacia aquél en las venas, Harvey decidió que la sangre era bombeada por el corazón hacia las arterias, posteriormente se trasvasaba a las venas, regresando por ellas al corazón, a continuación era bombeada de nuevo a las arterias, y así sucesivamente. En otras palabras, circulaba de forma continua en un mismo sentido a través del sistema cardiovascular. Los primeros anatomistas, incluyendo a Leonardo, habían insinuado ya tal idea, pero fue Harvey realmente el primero en establecer e investigar con detalle dicha teoría. Expuso sus ideas y experiencias en un pequeño y mal impreso libro titulado *De Motus Cordis* («relativo al movimiento del corazón»), que fue publicado en 1628 y que, desde entonces, ha sido considerado como una de las mayores obras clásicas de la Ciencia.
La cuestión principal que había dejado sin contestar la labor de Harvey fue: ¿Cómo pasa la sangre de las arterias a las venas? Harvey opinaba que debían de existir vasos que las conectaran de alguna manera, vasos que debían de tener un tamaño demasiado reducido para poderse ver. He aquí una reminiscencia de la teoría de Galeno sobre los pequeños orificios en la pared del corazón, pero, mientras que nunca se hallaron tales orificios —y en realidad no existen—, los vasos de conexión de Harvey fueron descubiertos tan pronto como se dispuso del microscopio. En 1661, tan sólo cuatro años después de la muerte de Harvey, un médico italiano llamado Marcello Malpighi, examinando los tejidos pulmonares de una rana con un microscopio primitivo, apreció que, con toda seguridad, existían finos vasos sanguíneos que conectaban las arterias con las venas. Malpighi los denominó «capilares», de la palabra latina que significa «similares a cabellos».
El uso de este nuevo instrumento hizo posible estudiar otras estructuras microscópicas. El naturalista holandés Jan Swammerdam descubrió los eritrocitos, mientras que el anatomista, también holandés, Regnier de Graaf descubrió los pequeños «folículos ováricos» en los ovarios de animales. Desde entonces pudieron estudiarse con todo detalle criaturas pequeñas tales como los insectos.
Los trabajos hechos con tanta precisión animaron a la realización de cuidadosas comparaciones de las estructuras de una especie con las estructuras de otras. El botánico inglés Nehemiah Grew fue el primer estudioso de importancia de la Anatomía comparada. En 1675 publicó sus estudios, en los que se comparan entre sí las estructuras del tronco de diversos árboles, y, en 1681, los estudios, comparativos también, sobre los estómagos de diversos animales.
La introducción del microscopio situó a los biólogos en un nivel más básico de la organización de los seres vivos: un nivel en el que todas las estructuras ordinarias podían ser reducidas a un denominador común. En 1665, el científico inglés Robert Hooke, utilizando un microscopio compuesto construido por él mismo, descubrió que el corcho, la corteza de cierto árbol, estaba constituido por compartimentos extraordinariamente pequeños similares a una esponja muy fina. A estos orificios los denominó «células», comparándolas a pequeñas habitaciones tales como las celdas de un monasterio. Más tarde, otros microscopistas hallaron luego «células» similares, aunque llenas de líquido, en los tejidos vivos.


Óvulo y espermatozoides humanos.

En el siguiente siglo y medio se hizo gradualmente más patente a los biólogos que toda la materia viva estaba constituida por células y que cada una de éstas constituía una unidad independiente de vida. Algunas formas de vida —tal como ciertos microorganismos— estaban formados por una única célula; los de mayores dimensiones eran el resultado de muchas células en cooperación. Uno de los primeros en proponer tal punto de vista fue el fisiólogo francés René-Joachim-Henri Dutrochet. No obstante, su comunicación, publicada en 1824, pasó inadvertida, y la teoría celular ganó importancia tan sólo después de que Matthias Jakob Schleiden y Theodor Schwann, de Alemania, la formularan, independientemente, en 1838 y 1839.
El líquido coloidal que llenaba ciertas células fue denominado «protoplasma» («la primera forma») por el fisiólogo checo Jan Evangelista Purkinje en 1839, y el botánico alemán Hugo von Mohl extendió el término para designar el contenido de todas las células. El anatomista alemán Max Johann Sigismund Schultze destacó la importancia del protoplasma como la «base física de la vida» y demostró la semejanza esencial del protoplasma en todas las células, tanto vegetales como animales y, asimismo, tanto en criaturas muy simples como en criaturas muy complejas.
La teoría celular es, respecto a la Biología, como la teoría atómica lo es respecto a la Química y a la Física.

Su importancia en la dinámica de la vida fue establecida cuando, alrededor de 1860, el patólogo alemán Rudolf Virchow afirmó, en una sucinta frase latina, que todas las células proceden de células. Demostró que las células de los tejidos enfermos eran producidas por la división de células originalmente normales.
En aquel entonces ya resultaba evidente que todo organismo vivo, incluso los de mayores dimensiones, empezaba su vida como una célula única. Uno de los primeros microscopistas, Johann Ham, ayudante de Leeuwenhoek, había descubierto en el semen pequeños cuerpos que más tarde fueron denominados «espermatozoos» (de las palabras griegas que significan «semilla animal»). Mucho más tarde, en 1827, el fisiólogo alemán Karl Ernst von Baer identificó el óvulo, o célula huevo, de los mamíferos. Los biólogos llegaron a la conclusión de que la unión de un óvulo y un espermatozoide formaba un óvulo fertilizado, a partir del cual eventualmente se desarrollaba el animal por repetidas divisiones y subdivisiones.



División de una célula por mitosis.

La cuestión fundamental era: ¿Cómo se dividen las células? La respuesta a esta cuestión se encontraba en un pequeño glóbulo de material relativamente denso en el interior de la célula, cuya existencia fue dada a conocer la primera vez por Robert Brown (el descubridor del movimiento browniano) en el año 1831, y denominado «núcleo». (Para distinguirlo del núcleo del átomo, lo denominaré a partir de ahora «núcleo celular».) Si un organismo celular se dividía en dos partes, conteniendo una de ellas el núcleo celular intacto, la parte que contenía el núcleo celular era capaz de crecer y dividirse, en tanto que la otra no lo hacía. (Más tarde se descubrió también que los glóbulos rojos de los mamíferos, carentes de núcleo, tienen una existencia breve y no poseen la capacidad de crecer y dividirse. Por este motivo, en la actualidad no son considerados como verdaderas células y, por lo común, se denominan «glóbulos».) Desgraciadamente, el ulterior estudio del núcleo celular y del mecanismo de la división se mantuvo estancado durante un largo período de tiempo, debido al hecho de que la célula era más o menos transparente, de tal modo que no podían distinguirse sus subestructuras. Luego mejoró la situación, gracias al descubrimiento de que algunos colorantes podían teñir ciertas partes de la célula, respetando a otras. Un colorante denominado «hematoxilina» (obtenido a partir del palo de Campeche) teñía de negro el núcleo celular y le permitía destacar claramente sobre el fondo de la célula. Después de que Perkin y otros químicos comenzaron a producir colorantes sintéticos, los biólogos dispusieron de toda una serie de ellos para escoger.

En 1879, el biólogo alemán Walther Flemming halló que con ciertos colorantes rojos podía teñir un material particular en el núcleo celular, material que se hallaba distribuido en éste en la forma de pequeños gránulos. Denominó a este material «cromatina» (del término griego para «color»). Examinando este material, Flemming fue capaz de apreciar algunas de las modificaciones que experimentaba durante el proceso de la división celular. En realidad, el colorante mata a la célula, pero en un corte de tejido mostrará diversas células en diferentes fases de la división celular. Son instantáneas que, consideradas conjuntamente, llegan a constituir una especie de «película animada» del proceso de la división celular.

En 1882, Flemming publicó un importante libro en el cual describe este proceso con más detalle. Al iniciarse la división celular, la cromatina se agrega para formar filamentos. La delgada membrana que limita el núcleo celular parece disolverse y, al mismo tiempo, un tenue objeto situado inmediatamente por fuera de aquel se divide en dos. Flemming denominó a este objeto el áster, de la palabra griega para «estrella», debido a que los filamentos que se desprendían de él le conferían el aspecto de un astro. Después de dividirse, las dos partes del áster se dirigían a puntos opuestos de la célula. Sus filamentos se unían al parecer a los de cromatina, que entretanto se habían dispuesto en el centro de la célula, y el áster arrastraba a la mitad de los filamentos de cromatina hacia cada una de las mitades de la célula. Como

resultado, la célula se estrangulaba en su mitad y, finalmente, se dividía en dos células. Se desarrollaba entonces un núcleo celular en cada una de las dos mitades, y el material cromatínico, que era rodeado por la membrana celular, se fragmentaba de nuevo en pequeños gránulos.
Flemming denominó al proceso de división celular «mitosis», de la palabra griega para «filamento», debido al importante papel desempeñado en él por los filamentos de cromatina. En 1888, el anatomista alemán Wilhelm von Waldeyer dio al filamento de cromatina el nombre de «cromosoma» (del griego «cuerpo coloreado»), y fue tan bien aceptado que ha persistido hasta nuestros días. No obstante, debe indicarse que los cromosomas, a pesar de su nombre, son incoloros en su estado natural, no teñido, con lo que resulta sumamente difícil distinguirlos. (A pesar de todo, fueron vistos en células de flores ya en 1848 por el botánico alemán, Wilhelm Friedrich Benedict Hofmeister.)
La observación reiterada de las células teñidas demostró que las células de cada especie de planta o animal tenían un número fijo y característico de cromosomas.
Antes de que la célula se divida en dos, durante la mitosis, se duplica el número de cromosomas, de tal modo que cada una de las dos células hijas, después de la división, tienen el mismo número que el de la célula madre original.
El embriólogo belga Eduard van Beneden descubrió, en 1885, que los cromosomas no duplicaban su número cuando se formaban las células germinales óvulo y espermatozoide. En consecuencia, cada célula óvulo y cada espermatozoide tienen sólo la mitad del número de cromosomas del que poseen las células ordinarias en el organismo. (La división celular que da lugar a espermatozoides y óvulos se denominó por lo tanto «meiosis», de una palabra griega que significa «hacer menos».) Cuando se unen un óvulo y un espermatozoide, la combinación (óvulo fertilizado) posee, sin embargo, una serie completa de cromosomas, siendo aportada la mitad de ella por la madre, a través del óvulo, y la otra mitad por el padre, mediante el espermatozoide. Seguidamente, a través del proceso normal de mitosis, este juego completo de cromosomas es transmitido a todas las células que constituyen el cuerpo del organismo que se desarrolla a partir del huevo fertilizado.
Aunque los tintes nos permiten ver los cromosomas, no facilitan la distinción entre un cromosoma determinado y los demás. Generalmente, todos ellos semejan una maraña de apelmazados spaghetti. Por ello se creyó durante mucho tiempo que cada célula humana contenía veinticuatro pares de cromosomas. Fue en 1956 nada menos cuando, tras un laborioso recuento de esas células (analizadas ciertamente a conciencia), se comprobó que el número exacto era 23 pares.
Por fortuna, este problema ha desaparecido. Se ha ideado una técnica (el tratamiento con una solución de sales muy diluida) que, aplicada apropiadamente, hincha las células y dispersa los cromosomas. Entonces se les puede fotografiar y luego se corta la fotografía en secciones, cada una de las cuales contiene un solo cromosoma. Si, seguidamente, se unen estos cromosomas por parejas y se los dispone en orden de longitud recreciente, se obtendrá un «cariotipo», una imagen del contenido cromosómico de la célula con numeración consecutiva.
El cariotipo es un instrumento muy útil y sutil para las diagnosis médicas, pues la separación entre los cromosomas no es siempre perfecta. En el proceso de la división celular cualquier cromosoma puede sufrir daños o incluso romperse. Algunas veces la separación no es regular y entonces alguna de las células nacientes puede tener un cromosoma de más, mientras que a otra le faltará uno. Estas anomalías deben perjudicar el trabajo celular, a veces en tal medida que la célula no podrá funcionar. (He aquí lo que presta una exactitud aparente al proceso de la mitosis que no es tan exacto como parece, pues tan sólo ocurre que se ocultan los errores.) Tales irregularidades resultan particularmente desastrosas cuando se producen en el proceso de la meiosis, porque entonces las células-huevo o cigotos nacen con imperfecciones en el complemento-cromosoma. Si un organismo consigue desarrollarse partiendo de ese estado imperfecto (usualmente no lo consigue) cada célula de su cuerpo, tendrá la misma imperfección y el resultado será una grave dolencia congénita.

La enfermedad más frecuente de este tipo acarrea un grave retraso mental. Se la denomina «síndrome de Down» (porque el médico inglés John Langdon Haydon Down fue quien la descubrió en 1866) y su caso se repite una vez por cada mil nacimientos. Se la conoce vulgarmente por el nombre de «mogolismo» porque entre sus síntomas figuran esos párpados sesgados que recuerdan el repliegue epicántico de los pueblos asiáticos orientales. La elección de ese nombre es deplorable, pues el síndrome tiene tanto que ver con los asiáticos como con los demás.

Hasta 1959 no se descubrió la causa del síndrome de Down. Durante aquel año, tres genetistas franceses —Jerôme-Jean Lejeune, M. Gautier y P. Turpin— contaron los cromosomas en las células de tres casos y encontraron que cada uno tenía 47 cromosomas en lugar de 46. Se comprobó que el error correspondía a *tres* miembros del par cromosomático ≠ 21. Bastante más tarde, en 1967, se localizó la imagen especular del mal. Se verificó que una niña subnormal de tres años tenía un solo cromosoma-21. Se encontró por primera vez un ser humano con un cromosoma de menos.

Los casos de este tipo referidos a otros cromosomas parecen menos generalizados, pero siempre surgen uno u otro. Ciertos pacientes con una clase especial de leucemia muestran en sus células un fragmento cromosómico adicional apenas perceptible. Se le llama el «cromosoma Filadelfia» porque se le descubrió en un paciente hospitalizado en aquella ciudad. Generalmente, los cromosomas rotos se manifiestan con frecuencia superior a la normal en ciertas enfermedades poco comunes.

Genes

Hacia 1860, un monje austríaco llamado Gregor Johann Mendel, que estaba demasiado ocupado con sus quehaceres monásticos para prestar atención a la excitación que el fenómeno de la división celular ocasionaba en el biólogo, había realizado pacientemente algunas experiencias en su jardín, que estaban destinadas, eventualmente, a dar sentido a la existencia de los cromosomas. Gregor Johann Mendel era un botánico aficionado, y estaba particularmente interesado en los resultados del cruzamiento de guisantes de diversas características. Su gran intuición fue estudiar una característica claramente definida en cada caso. Cruzó plantas cuyas semillas mostraban una diferente coloración (verde o amarilla), o guisantes de semillas lisas con otras de semillas rugosas, o plantas de tallo largo con otras de tallo corto, y se dedicó a observar los resultados en las plantas de las sucesivas generaciones. Con sumo cuidado, Mendel anotó estadísticamente dichos resultados, y las conclusiones a que llegó pueden resumirse esencialmente de este modo:

1.º Cada característica estaba gobernada por «factores» que (en los casos estudiados por Mendel) podían existir en una de dos formas distintas. Una versión del factor para el color de las semillas, por ejemplo, causaría que estas semillas fueran verdes; la otra forma determinaría que fueran amarillas. (Por comodidad, permítasenos utilizar los términos en la actualidad vigentes. Los factores son denominados hoy en día «genes», término acuñado en 1909 por el biólogo danés Wilhelm Ludwig Johannsen a partir de una palabra griega que significa «generar», y las diferentes formas de un gen que controlan una característica dada se denominan «alelos». Así, el gen que determina el color de las semillas poseía dos alelos, uno para las semillas verdes, y el otro para las amarillas.)

2.º Cada planta tenía un par de genes para cada característica, siendo aportado cada uno de ellos por un progenitor. La planta transmitía uno de su par a una célula germinal, de tal modo que cuando las células germinales de dos plantas se unían por polinización, las nuevas plantas generadas tenían de nuevo dos genes para la característica. Los dos genes podían ser idénticos o alelos.

3.º Cuando las dos plantas progenitoras aportaban alelos de un gen particular a la planta generada, un alelo podía neutralizar el efecto del otro. Por ejemplo, si una planta que producía semillas amarillas se cruzaba con una que producía semillas verdes, todos los miembros de la generación siguiente producirían semillas

amarillas. El alelo amarillo del gen determinante del color de las semillas era «dominante», el alelo verde «recesivo».

4.º No obstante, el alelo recesivo no resultaba destruido. El alelo verde, en el caso últimamente citado, todavía se hallaba presente, aún cuando no produjera un efecto detectable. Si se cruzaban dos plantas que contenían genes mezclados (es decir, cada una con un alelo amarillo y uno verde), algunas de las plantas generadas tendrían dos alelos verdes en el óvulo fertilizado; en este caso, las plantas que se originaran darían lugar a semillas verdes, y los descendientes de tales progenitores volverían a producir también semillas verdes. Mendel indicó que existían cuatro formas posibles de combinar los alelos de un par de progenitores híbridos, cada uno de los cuales poseyera un alelo amarillo y uno verde. Un alelo amarillo procedente del primer progenitor se combinaría con un alelo amarillo proveniente del segundo; un alelo amarillo a partir del primer progenitor se combinaría con un alelo verde procedente del segundo; un alelo verde del primero se combinaría con un alelo amarillo del segundo; y, finalmente, un alelo verde del primero se combinaría con un alelo verde del segundo. De las cuatro combinaciones, tan sólo la última daría lugar a una planta productora de semillas verdes. Suponiendo que la totalidad de las cuatro combinaciones fueran igualmente probables, la cuarta parte de las plantas de una nueva generación produciría semillas verdes. Mendel pudo comprobar que esto ocurría realmente así.

5.º También demostró Mendel que las características de diferente clase —por ejemplo, color de las semillas y color de las flores— eran heredadas independientemente unas de otras. Es decir, las flores rojas podían aparecer asociadas tanto a semillas amarillas, como a semillas verdes. Lo mismo ocurría con las flores blancas.

Mendel realizó estas experiencias en los albores de la década 1860-1870; las anotó con sumo cuidado y envió una copia de su trabajo a Karl Wilhelm von Nägeli, un botánico suizo de gran reputación. La reacción de Nägeli fue negativa. Von Nägeli tenía, aparentemente, predilección por las teorías más generalizadas (su propia labor teórica era semimística y estaba oscuramente expresada), y concedió escaso mérito al simple recuento de los guisantes como medio conducente a la verdad. Por añadidura, Mendel era un aficionado desconocido.

Al parecer, Mendel se descorazonó por los comentarios de Nägeli, pues regresó a sus quehaceres monásticos, engordó (demasiado para trabajar en el jardín) y abandonó sus investigaciones. Sin embargo, publicó sus trabajos en 1866 en una revista austríaca de provincias, no consiguiendo atraer la atención durante toda una generación.

Pero otros científicos se dirigían lentamente hacia las mismas conclusiones a que había llegado Mendel (a pesar de desconocerlas). Una de las sendas por la que llegaron a adquirir interés por la Genética fue el estudio de las «mutaciones», es decir, de animales de extravagante naturaleza, o monstruos, que siempre habían sido considerados como malos augurios. (La palabra «monstruo» procede de una latina que significa «peligro».) En 1791, un agricultor de Massachusetts, llamado Seth Wright, adoptó un punto de vista más práctico al contemplar una rara variedad animal que había aparecido en su rebaño de ovejas. Uno de los corderos había nacido con las extremidades extraordinariamente cortas, y se le ocurrió al sagaz yanqui que con semejantes patas no podría saltar las bajas paredes de piedra que circundaban su granja. Por ello, y deliberadamente, creó una raza de ovejas de patas cortas partiendo de su no desafortunado accidente.

Esta demostración práctica estimuló a que otros exploraran la utilidad de diversas mutaciones. A finales del siglo XIX, el horticultor norteamericano Luther Burbank consiguió una serie de éxitos al obtener cientos de nuevas variedades de plantas, que ofrecían ciertas ventajas con respecto a las antiguas, en un sentido o en otro, y, no sólo por mutaciones, sino mediante juiciosos cruzamientos e injertos.

Mientras tanto, los botánicos intentaban hallar por su cuenta una explicación para las mutaciones, y, constituyendo quizá la más sorprendente coincidencia en la historia de la Ciencia, no menos

de tres hombres, de manera independiente y en el mismo año, llegaron precisamente a las mismas conclusiones que Mendel había alcanzado una generación antes. Estos hombres fueron Hugo de Vries, holandés, Karl Erich Correns, alemán y Erich van Tschermak, austríaco. En ningún caso se conocían entre sí, ni tampoco la obra de Mendel. Los tres publicaron sus trabajos en 1900. Los tres, en una revisión final de las publicaciones anteriores en este campo, descubrieron el trabajo de Mendel, siendo grande su sorpresa. Los tres publicaron sus resultados en 1900, citando cada uno de ellos el trabajo de Mendel y atribuyendo a éste el mérito del descubrimiento, a la vez que calificaban su propio trabajo de una simple confirmación de los trabajos del monje. Inmediatamente, una serie de biólogos vieron la relación que existía entre los genes de Mendel y los cromosomas que podían verse con el microscopio. El primero en trazar un paralelo en este sentido fue el citólogo norteamericano Walter S. Sutton en 1904. Indicó que los cromosomas, al igual que los genes, aparecían a pares, uno de los cuales era heredado a partir del padre y el otro de la madre. El único inconveniente que surgía con esta analogía era que el número de cromosomas en las células de cualquier organismo era mucho menor que el número de características heredadas. El hombre, por ejemplo, tiene sólo 23 pares de cromosomas y, sin embargo, posee millares de características hereditarias. Por ello, los biólogos llegaron a la conclusión que los cromosomas no eran genes. Cada uno de ellos debía de ser una agrupación de genes. Poco después, los biólogos descubrieron una magnífica herramienta para estudiar los genes específicos. No se trataba de un instrumento físico, sino de una nueva clase de animal de laboratorio. En 1906, el zoólogo Thomas Hunt Morgan, de la Universidad de Columbia, concibió la idea de utilizar moscas de la fruta *(Drosophila melanogaster)* para las investigaciones en genética. (El término «Genética» fue inventado aproximadamente en esta época por el biólogo británico William Bateson.) Las moscas de la fruta ofrecen considerables ventajas con respecto a los guisantes (o cualquier animal común de laboratorio) para el estudio de la herencia de los genes. Se reproducen rápidamente y son muy prolíficas; pueden alimentarse a cientos con muy poca comida, tienen tipos de características hereditarias que pueden ser observadas con facilidad, y, por último, poseen una dotación cromosómica comparativamente simple: sólo cuatro pares de cromosomas por célula.

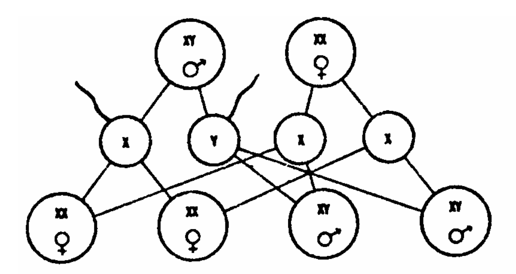
Con la mosca de la fruta, Morgan y sus colaboradores descubrieron un hecho importante por lo que se refería al mecanismo de la herencia del sexo. Hallaron que la mosca de la fruta hembra tenía cuatro pares de cromosomas perfectamente aparejados, de tal modo que todas las células-huevo, que recibían uno de cada par, eran idénticas por lo que se refería a su dotación cromosómica. Sin embargo, en el macho, uno de cada uno de los cuatro pares consistía de un cromosoma normal, llamado el «cromosoma *X*», y de un cromosoma menos desarrollado, que fue denominado el «cromosoma *Y*». Por lo tanto, cuando se forman los espermatozoides, la mitad de ellos tienen un cromosoma *X* y la otra mitad un cromosoma *Y*. Cuando un espermatozoide con el cromosoma *X* fertiliza un óvulo, el huevo fertilizado, con los cuatro pares aparejados, naturalmente dará lugar a una hembra. Por otra parte, un espermatozoide con un cromosoma *Y* producirá un macho. Ya que ambas alternativas son igualmente probables, el número de machos y hembras en las especies típicas de los seres vivientes es más o menos igual. (En algunas criaturas, especialmente en diversos pájaros, la hembra es la que tiene un cromosorna *Y.)* Esta diferencia cromosómica explica por qué algunos trastornos o mutaciones sólo se observan en el macho.

Si existe un gen defectuoso en uno de un par de cromosomas *X*, el otro miembro del par aún puede ser normal y de este modo salvar la situación. Pero, en el macho, un defecto en el cromosoma *X*, apareado con el cromosoma *Y*, por lo general, no puede ser compensado, debido a que el último contiene muy pocos genes. Por lo tanto el defecto se pondrá de manifiesto.

El ejemplo más notorio de esa enfermedad «relacionada con el sexo» es la «hemofilia», un estado morboso en que la sangre se coagula a duras penas cuando lo consigue. Los individuos hemofílicos corren constantemente el riesgo de desangrarse hasta

la muerte por causas insignificantes, o bien sufren terribles agonías producidas por las hemorragias internas. Una mujer portadora de un gen que produzca hemofilia en uno de sus cromosomas *X*, tiene muchas probabilidades de poseer un gen normal de posición idéntica en el otro cromosoma *X*. Por consiguiente no padecerá la enfermedad. Sin embargo, será un «vehículo contaminador». La mitad de los cigotos que ella forma tendrán el cromosoma *X* normal, y la otra mitad el cromosoma *X* hemofílico. Si la esperma con el cromosoma *X* de un macho normal fertiliza el huevo con el cromosoma *X* anómalo, la criatura resultante será una niña no hemofílica, aunque sí nuevamente un «vehículo contaminador»; si lo fertiliza la esperma con cromosoma *Y* de un macho normal, el gen hemofílico en el óvulo no encontrará ninguna resistencia por parte del cromosoma *Y*; así, pues, el resultado será un niño con hemofilia. Aplicando la ley de probabilidades a los portadores de la hemofilia se llega a esta conclusión: la mitad de sus hijos serán hemofílicos, y la mitad de sus hijas serán nuevas portadoras sanas del germen.

La portadora más eminente de hemofilia en la Historia universal fue la reina Victoria de Inglaterra. Sólo fue hemofílico uno de sus cuatro hijos (el primogénito, Leopoldo). Eduardo VII —de quien descienden los últimos monarcas británicos— se salvó; así, pues, hoy día no hay hemofilia en la familia real británica. Sin embargo, dos hijas de Victoria fueron portadoras del germen. Una tuvo una hija (igualmente portadora) que contrajo matrimonio con el zar Nicolás II de Rusia. De resultas, su único hijo fue hemofílico, lo cual contribuyó a alterar la historia de Rusia y del mundo, porque aprovechando su influjo sobre el pequeño hemofílico, el monje Grigori Rasputín ganó ascendiente en Rusia y provocó un descontento general que terminaría desencadenando la revolución. La otra hija de Victoria tuvo también una hija (asimismo portadora) que se unió matrimonialmente con la casa real de España, difundiendo allí la hemofilia. Por su presencia entre los Borbones españoles y los Romanov rusos, la hemofilia recibió algunas veces el nombre de «enfermedad regia» pero no tiene ninguna conexión especial con la realeza, si se exceptúa el infortunado caso de Victoria.



Combinaciones de los cromosomas X e Y.

Otro desorden menos importante relacionado con el sexo es la acromatopsia, mucho más común entre los hombres. Realmente, la ausencia de un cromosoma X puede producir entre los hombres suficiente debilidad para justificar el hecho de que las mujeres estén mejor protegidas contra la muerte desde las infecciones prenatales y suelan vivir entre tres y siete años más que los hombres como promedio. En cierto modo, los veintitrés pares completos proporcionan a las mujeres un organismo biológico más sano.

Los cromosomas *X* e *Y* (o «cromosomas sexuales») se colocan arbitrariamente al fin del cariotipo, aún cuando el cromosoma *X* figura entre los más largos. Aparentemente, las anormalidades cromosómicas, tales como las del síndrome Down, son más comunes entre los cromosomas sexuales. Tal vez no sea porque los cromosomas sexuales tengan más probabilidades de verse complicados con las mitosis anormales, sino quizá porque las anomalías del cromosoma sexual tienen menos probabilidades de ser fatales, por lo cual muchos seres incipientes consiguen nacer con ellas.

El tipo de anormalidad cromosómica sexual que ha despertado más interés es el del macho, cuyas células tienen un cromosoma *Y* adicional, es decir, el tipo *XYY* por así decirlo. Resulta que los varones *XYY* son bastante intratables. Generalmente, se trata de

individuos altos, fornidos e inteligentes, pero caracterizados por una propensión a la ira y la violencia. Se supone que Richard Speck, el asesino de ocho enfermeras en Chicago el año 1966, pertenecía al tipo *XYY*. En octubre de 1968 se absolvió a otro asesino en Australia alegándose que era un *XYY* y, por tanto, no responsable de sus actos. Aproximadamente, el 4 % de los reclusos en cierta prisión escocesa han resultado ser *XYY* y se calcula que la combinación *XYY* puede darse en uno de cada 3.000 hombres.

Parece, pues, plausible que se estime conveniente realizar un examen cromosómico de cada persona, e inexcusablemente de cada recién nacido. Como en el caso de otros procedimientos, sencillos teóricamente pero muy laboriosos a la hora de practicarlos, se está ensayando la realización de ese proceso con el concurso de la computadora.

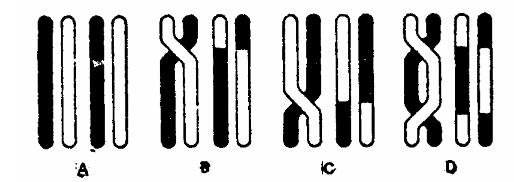
La investigación con moscas de la fruta mostró que los caracteres no eran necesariamente heredados de forma independiente, como había supuesto Mendel. Ocurría que las siete características en los guisantes que él había estudiado eran gobernadas por genes en cromosomas distintos. Morgan descubrió que, cuando dos genes que gobernaban dos características diferentes se hallaban situados sobre el mismo cromosoma, aquellas características, por lo general, eran heredadas conjuntamente (del mismo modo como un pasajero en el asiento anterior de un coche y uno en el sentido posterior viajan juntos). Sin embargo, esta unión genética no es inalterable. Del mismo modo que un pasajero puede cambiar de coche, también un fragmento de un cromosoma puede, en ocasiones, unirse a otro cromosoma, intercambiándose con un fragmento del otro. Tal cruzamiento *(crossing over)* puede producirse durante la división de una célula. A consecuencia de ello, se separan caracteres ligados y, barajados de nuevo, dan lugar a una nueva ligazón. Por ejemplo, existe una variedad de la mosca de la fruta con ojos escarlata y alas rizadas. Cuando esta variedad es cruzada con una mosca de la fruta de ojos blancos y alas pequeñas, los descendientes tendrán, por lo general, ojos rojos y alas rizadas u ojos blancos y alas pequeñas. Pero el acoplamiento puede, en ocasiones, dar lugar a una mosca con ojos blancos y alas rizadas o a una con ojos rojos y alas pequeñas, a consecuencia del cruzamiento *(crossing over)*. La nueva forma persistirá en las generaciones sucesivas, a menos que se produzca un nuevo cruzamiento.

Ahora imaginemos un cromosoma con un gen para los ojos rojos en un extremo y un gen para las alas rizadas en el otro. Permítasenos suponer que en la parte central del cromosoma existen dos genes adyacentes que gobiernan otras dos características. Evidentemente, la probabilidad de que tenga lugar una rotura de ese punto particular, que separa a esos dos genes, es menor que la probabilidad de que se produzca una rotura en uno de los muchos puntos a lo largo del segmento del cromosoma que separa a los genes en los extremos opuestos. Mediante la anotación de la frecuencia de separación por cruzamiento de pares dados de características ligadas, Morgan y sus colaboradores, sobre todo Alfred Henry Sturtevant, fueron capaces de deducir la localización relativa de los genes en cuestión y, de este modo, elaboraron «mapas» cromosómicos de las localizaciones de los genes en la mosca de la fruta. La localización así determinada constituye el *locus* de un gen.

A partir de tales mapas cromosómicos y del estudio de los cromosomas gigantes, muchas veces más grande que los de tamaño ordinario, hallados en las glándulas salivares de la mosca de la fruta, se ha establecido que el insecto tiene un mínimo de 10.000 genes en un par de cromosomas. Esto significa que el gen individual debe tener un peso molecular de 60 millones. Según este hallazgo, los cromosomas algo mayores del ser humano deberían contener de 20.000 a 90.000 genes por par de cromosomas o, en conjunto, unos dos millones. Por su trabajo sobre la genética de las moscas de la fruta, Morgan recibió en 1933 el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

El conocimiento creciente sobre los genes permite esperar que algún día sea posible analizar y modificar la herencia genética de los individuos humanos, bien sea interceptando el desarrollo de condiciones anómalas graves o corrigiéndolas tan pronto como

acusen desviaciones. Esa «ingeniería genética» requerirá mapas cromosómicos del organismo humano, lo cual implicará, evidentemente, una labor mucho más complicada que la referente a la mosca de la fruta. En 1967 se consiguió simplificar esa tarea de forma sorprendente cuando Howard Green, de la Universidad de Nueva York, compuso células híbridas con cromosomas humanos y de ratón. Relativamente pocos cromosomas humanos persistieron después de varias divisiones celulares; y se pudo localizar con más facilidad el efecto resultante de su actividad.
En 1969 se dio otro paso hacia el conocimiento y la manipulación del gen cuando el bioquímico norteamericano Jonathan Beckwith y sus colaboradores lograron aislar un gen por primera vez en la historia. Procedía de una bacteria intestinal y controlaba un aspecto del metabolismo del azúcar.
Alguna que otra vez, con una frecuencia que puede ser calculada, tiene lugar un cambio repentino en un gen. La mutación se manifiesta por alguna característica física nueva e inesperada, tal como las extremidades cortas del cordero del agricultor Wright. Las mutaciones son relativamente poco frecuentes en la Naturaleza. En 1926, el genetista Hermann Joseph Muller, que había sido miembro del equipo de investigación de Morgan, halló una forma para aumentar artificialmente la frecuencia de las mutaciones en las moscas de la fruta, de tal modo que podía estudiarse más fácilmente la herencia de tales modificaciones. Descubrió que los rayos *X* podían servir para este fin; probablemente lesionaban los genes. El estudio de las mutaciones, hecho posible gracias al descubrimiento de Muller, le hicieron acreedor del premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1946.
Las investigaciones de Muller han dado origen a algunas ideas más bien inquietantes por lo que respecta al futuro de la especie humana. Si bien las mutaciones son una importante fuerza motriz en la evolución, al dar lugar en ocasiones a mejoras que permiten a una especie adaptarse mejor a su medio ambiente, dichas mutaciones beneficiosas constituyen más bien la excepción. La mayoría de las mutaciones —al menos el 99 % de ellas— reportan algún tipo de detrimento, y algunas incluso son letales. Eventualmente, aún aquellos que sólo son ligeramente perjudiciales, desaparecen, debido a que sus portadores tampoco progresan y dan lugar a menos descendientes que los individuos sanos. Pero, entretanto, una mutación puede causar enfermedad y sufrimiento durante muchas generaciones. Además, aparecen continuamente nuevas mutaciones, y cada especie soporta una carga constante de genes defectuosos. Las diferentes variedades genéticas —incluyendo abundantes cantidades de variedades gravemente nocivas— en las poblaciones normales, quedaron bien demostradas con el trabajo del genetista ruso-americano Theodosius Dobzhansky, realizado entre 1930 y 1940. Esta diversidad impulsa la marcha de la evolución, pero la gran cantidad de genes nocivos (la «carga genética») obliga a mirar el futuro con pesimismo. Dos desarrollos modernos parecen contribuir constantemente a que esta carga sea cada vez mayor.



Entrecruzamientos de los cromosomas.

En primer lugar, los avances de la Medicina y la asistencia social tienden a compensar los *handicaps* de las personas con mutaciones que implican algún detrimento, al menos hasta el punto que se conserva la capacidad reproductora de estos individuos. Las gafas están al alcance de los individuos con defectos en la visión; la insulina conserva la vida de los que padecen diabetes (una enfermedad hereditaria), etc. Así, estas personas taradas transmiten sus genes defectuosos a las generaciones futuras. Las alternativas —permitir que los individuos defectuosos mueran jóvenes o bien esterilizarlos o aislarlos— son, por supuesto, inimaginables, salvo cuando el defecto es lo suficientemente acusado como para convertir a un

individuo en algo menos que un ser humano, como ocurre en la idiotez o en la paranoia homicida. Indudablemente, la especie humana aún puede soportar su carga de genes negativamente mutados, a pesar de sus impulsos humanitarios.

Pero hay menos excusa para el segundo peligro moderno: a saber, el incremento de esa carga por una innecesaria exposición a la radiación. La investigación genética demuestra de forma incontrovertible que, para la población globalmente considerada, incluso un ligero aumento en la exposición general a la radiación implica un incremento correspondientemente pequeño de la frecuencia de la mutación, y, desde 1895, la Humanidad ha sido expuesta a tipos e intensidades de radiación de las cuales nada sabían las generaciones precedentes. La radiación solar, la radiactividad natural del suelo y los rayos cósmicos siempre han estado con nosotros. Ahora, sin embargo, empleamos, muchas veces con liberalidad, los rayos *X* en Medicina y en Odontología; concentramos material radiactivo, creamos artificialmente isótopos radiactivos de potencia radiactiva terrorífica; incluso llegamos a hacer estallar bombas nucleares. Todo esto contribuye a aumentar la radiación que incide sobre el ser humano.

Por supuesto, nadie se atrevería a sugerir que fuera abandonada la investigación en Física nuclear, o que los rayos *X* no fueran utilizados en Medicina y Odontología.

Sin embargo, debe recomendarse seriamente el reconocimiento del peligro existente y la reducción al mínimo de la exposición a la radiación; que, por ejemplo, los rayos *X* sean utilizados de forma discriminada y con cuidado, y que los órganos sexuales sean protegidos de modo rutinario, durante el uso de aquéllos. Otra precaución a sugerir es que cada individuo lleve un registro de su exposición total acumulada a los rayos *X*, de tal modo que tenga una cierta idea de si está en peligro de exceder un límite razonable.

Por supuesto, los genetistas no estaban seguros de que los principios establecidos por las experiencias realizadas en plantas e insectos fueran necesariamente aplicables al ser humano. Después de todo, el hombre no era ni un guisante ni una mosca de la fruta. Pero los estudios directos de ciertas características del ser humano revelaron que la Genética humana seguía las mismas reglas. El ejemplo mejor conocido es el de la herencia de los tipos sanguíneos. La transfusión de sangre es una práctica muy antigua, y ya en ocasiones los médicos de antaño intentaron transfundir sangre animal a personas debilitadas por la pérdida de sangre. Pero las transfusiones, incluso las de sangre humana, a menudo eran mal toleradas, por lo que en ocasiones se llegaron a dictar leyes que las prohibían.

En el año 1890, el patólogo austríaco Karl Landsteiner descubrió finalmente que la sangre humana era de distintos tipos, algunos de los cuales presentaban incompatibilidad con los restantes. Comprobó que, en ocasiones, cuando la sangre de una persona se mezclaba con una muestra de suero (el líquido de la sangre que permanece una vez se han eliminado los glóbulos rojos y el factor coagulante) procedente de otro individuo, los glóbulos rojos de la sangre completa de la primera persona se aglutinaban. Evidentemente, una mezcla de este tipo traería muy malas consecuencias si tuviera lugar durante la transfusión, e incluso podría matar al paciente si las células aglutinadas bloqueasen la circulación sanguínea en vasos de vital importancia. Landsteiner halló, sin embargo, que algunos tipos de sangre podían mezclarse sin causar tal aglutinación nociva.

Hacia el año 1902, Landsteiner fue capaz de anunciar que existían cuatro tipos de sangre humana, a los que llamó A, B, AB y O. Un individuo dado poseía sólo la sangre de uno de estos tipos, y, por supuesto, un tipo particular de sangre podía ser transfundido sin peligro a otra persona que tuviera el mismo tipo. Por añadidura, la sangre del tipo O podía ser transfundida sin ningún riesgo a otra persona, fuera cual fuere su tipo, en tanto la sangre A y la sangre B podían ser mezcladas con las de un paciente AB. Sin embargo, tendría lugar una aglutinación de glóbulos rojos, si la sangre AB se transfundía a un individuo A o B, al mezclarse la A y la B, o cuando una persona con el tipo O recibiera la transfusión de cualquier sangre distinta a la suya. (Por ello, debido a las posibles reacciones séricas, por lo general se administra a los pacientes

únicamente la sangre de su propio tipo.) En 1930, Landsteiner (que por entonces adquirió la ciudadanía estadounidense) recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología.
Los genetistas han establecido que estos tipos de sangre (y todos los otros descubiertos desde entonces, incluso las variaciones del factor Rh), son heredadas de forma estrictamente acorde con las leyes de Mendel. Parece que existen tres alelos génicos, responsables respectivamente de la sangre A, B y O. Si ambos progenitores tienen la sangre de tipo O, todos los niños generados por éstos poseerán sangre del tipo O. Si un progenitor tiene sangre del tipo O y el otro del tipo A, la sangre de todos estos niños será del tipo A, pues el alelo A es dominante con respecto al O. El alelo B, de manera similar, es dominante con relación al alelo O. Sin embargo, los alelos B y A no muestran dominación entre sí y un individuo que posee ambos alelos tendrá sangre del tipo AB.
Las leyes de Mendel son seguidas de forma tan estricta, que los grupos sanguíneos pueden ser, y son, utilizados para determinar la paternidad. Si una madre con sangre del tipo O tiene un niño con sangre del tipo B, el padre del niño debe ser de tipo B, pues el alelo B tiene que haber procedido forzosamente de algún lado. Si el marido de dicha mujer pertenece al A o al O, es evidente que ésta ha sido infiel (o bien que ha tenido lugar un cambio de niños en el hospital). Si una mujer del tipo O con un niño del tipo B, acusa a un hombre A u O de ser el padre, es claro que se ha confundido o bien que miente. Por otra parte, mientras que el tipo de sangre puede en ocasiones excluir una posibilidad, nunca constituye, en cambio, una prueba positiva. Si el marido de la mujer, o el hombre acusado, es del tipo B, el problema no estará totalmente resuelto. Cualquier hombre del tipo B, o cualquier hombre del tipo AB, podría haber sido el padre.
La aplicabilidad de las leyes de Mendel de la herencia a los seres humanos también ha sido confirmada por la existencia de caracteres ligados al sexo. La acromaptosia y la hemofilia (un defecto hereditario de la coagulación de la sangre) se observan de modo casi exclusivo en los varones, y son heredadas precisamente de la misma manera a como las características ligadas al sexo son heredadas en la mosca de la fruta.
Naturalmente, surge la idea de la conveniencia de prohibir a las personas con tales afecciones que tengan hijos y, de esta manera, suprimir la afección. Dirigiendo adecuadamente los cruzamientos, podría incluso llegar a mejorarse la especie humana, de modo similar a lo que se hace con el ganado. Por supuesto, ésta no es una idea nueva.
Los antiguos espartanos ya la tuvieron, e intentaron ponerla en práctica hace unos 2.500 años. En la actualidad esta idea fue revivida por un científico inglés, Francis Galton (primo de Charles Darwin). En 1883, acuñó el término «Eugenesia» para describirlo (la palabra deriva del griego y significa «buen nacimiento»).
Galton desconocía en su tiempo los hallazgos de Mendel. No comprendía que las características podían estar ausentes y ser, no obstante, transmitidas como recesivas. No comprendía tampoco que se heredaban grupos de características de forma intacta y que sería difícil eliminar una no deseable sin suprimir al propio tiempo una deseable. Ni siquiera sabía que las mutaciones podían introducir características indeseables en cada generación.
La genética humana es un tema enormemente complicado, que no es probable que se estudie en toda su extensión en un futuro previsible. El ser humano no da lugar a descendientes ni con tanta frecuencia ni en número tan grande a como lo hace la mosca de la fruta; sus descendientes no pueden ser sometidos a un control de laboratorio con fines experimentales; tiene muchos más cromosomas y características heredadas que la mosca de la fruta; las características humanas en las que estamos más interesados, tales como el genio creador, la inteligencia, la fuerza moral, son extraordinariamente complejas e implican la interrelación de numerosos genes e influencias ambientales. Por todas estas razones, los profesionales no pueden estudiar la genética humana con la misma confianza con que abordan la genética de la mosca de la fruta.
Por lo tanto, la Eugenesia sigue siendo un sueño, confuso e insustancial, debido a la falta de conocimientos. Aquellos que en

la actualidad abogan decididamente en favor de programas elaborados de Eugenesia, tienden a ser racistas o excéntricos.
¿De qué modo determina un gen la manifestación de la característica física de la cual es responsable? ¿Cuál es el mecanismo por el que da origen a semillas amarillas en los guisantes, a alas rizadas en las moscas de la fruta, o a ojos azules en los seres humanos? Hoy en día los biólogos tienen la certeza de que los genes ejercen sus efectos a través de las enzimas. Uno de los casos más evidentes es el del color de los ojos, el pelo y la piel. El color (azul o pardo, amarillo o negro, rosa o pardo, o mezclas de ellos) viene determinado por la cantidad existente del pigmento denominado melanina (de la palabra griega para «negro»), que se halla presente en el iris de los ojos, en el pelo o en la piel. La melanina se forma a partir de un aminoácido, la tirosina, a través de una serie de fases, cuya naturaleza se ha dilucidado en la mayor parte de los casos. Se hallan implicadas una serie de enzimas, y la cantidad de melanina formada dependerá de la cantidad de éstas. Por ejemplo, una de las enzimas que cataliza las dos primeras fases, es la tirosina. Seguramente, algún gen particular controla la producción de tirosinasa por las células. De este modo controlará también la coloración de la piel, el pelo y los ojos. Y, puesto que el gen es transmitido de una generación a otra, los niños naturalmente se parecerán a sus padres en el color. Si una mutación determina la aparición de un gen defectuoso que no pueda formar tirosinasa, no existirá melanina y el individuo será «albino » La ausencia de una simple enzima (y, por lo tanto, la deficiencia de un único gen) será suficiente para determinar un cambio importante en las características personales.
Establecido el hecho que las características de un organismo son controladas por su dotación de enzimas, que a su vez es controlada por los genes, se plantea la siguiente cuestión: ¿Cómo actúan los genes? Desgraciadamente, incluso la mosca de la fruta es un organismo demasiado complejo para estudiar el problema con detalle. Pero, en 1941, los biólogos norteamericanos George Wells Beadle y Edward Lewrie Tatum iniciaron un estudio de este tipo con un organismo sencillo al que consideraron admirablemente adecuado para este fin. Se trataba de un hongo muy frecuente en la Naturaleza, el *Neurospora crassa.*
La *Neurospora* no es muy exigente por lo que a su alimentación respecta. Crecerá muy bien sobre el azúcar junto con compuestos inorgánicos que aporten nitrógeno, azufre y diversos minerales. Además del azúcar, la única sustancia orgánica que debe añadirse al medio es una vitamina denominada «biotina». En una cierta fase de su ciclo vital, el moho produce ocho esporas, todas ellas de idéntica constitución genética. Cada espora contiene siete cromosomas; como en la célula sexual de un organismo más complejo, sus cromosomas aparecen aislados, no en parejas. En consecuencia, si se cambia uno de sus cromosomas, el efecto puede ser observado, debido a que no se halla presente la pareja normal que pueda enmascarar el efecto. Por lo tanto, Beadle y Tatum fueron capaces de crear mutaciones en la *Neurospora*, exponiendo el moho a los rayos X y siguiendo luego los efectos específicos en el comportamiento de las esporas.
Si, después que el moho había recibido una dosis de radiación, las esporas todavía se desarrollaban en el medio usual de sustancias nutritivas, evidentemente no se había producido una mutación, al menos, hasta el punto de alterar las necesidades nutritivas del organismo para su crecimiento. Si las esporas no crecían en el medio usual, los experimentadores proseguían la investigación para determinar si estaban vivas o muertas, proporcionándoles un medio completo que contuviera todas las vitaminas, aminoácidos y otros principios que eventualmente pudiera precisar. Si las esporas crecían en este medio, se llegaba a la conclusión de que los rayos X habían producido una mutación que había modificado las necesidades nutritivas de la *Neurospora.* Aparentemente, ahora precisaba al menos un nuevo componente en su dieta. Para hallar cuál era éste, los experimentadores sometieron a las esporas a una dieta y luego a otra, y a otra más, en cada ocasión con algunos nuevos componentes que no se hallaban presentes en el medio completo. Podían omitir todos los aminoácidos o la totalidad de las diversas vitaminas, o todos menos uno o dos aminoácidos, o una o dos vitaminas. De esta forma fueron delimitando las

necesidades, hasta identificar exactamente qué era lo que la espora precisaba entonces en su dieta, que no estaba presente en la utilizada antes de la mutación.
En ocasiones parecía que la espora mutada requería el aminoácido arginina. La «cepa salvaje» normal, había sido capaz de fabricar su propia arginina a partir del azúcar y las sales de amonio. Ahora, debido a la modificación genética, ya no podía sintetizar argirina, y, a menos que se añadiera este aminoácido al medio nutricio, no podría producir proteínas y, en consecuencia, desarrollarse.
La forma más clara para explicar una situación de este tipo era suponer que los rayos X habían alterado un gen responsable de la formación de una enzima necesaria para la síntesis de arginina. Al carecer del gen normal, la *Neurospora* ya no podía elaborar la enzima. Y, sin enzima, no producía arginina. Beadle y sus colaboradores empezaron a utilizar este tipo de información para estudiar la relación de los genes con la química del metabolismo. Era una forma para mostrar, por ejemplo, que en la elaboración de la quinina se hallaba implicado más de un gen. Al objeto de simplificar la exposición, supongamos que dos genes —el gen *A* y el gen *B*— son responsables de la formación de dos enzimas distintas, siendo ambas necesarias para la síntesis de la quinina. Entonces, una mutación en el gen *A* o en el gen *B* anularía la capacidad de la *Neurospora* para producir el aminoácido. Supongamos que irradiamos dos colonias de *Neurospora* y producimos una cepa sin arginina en cada una de aquéllas. Si tenemos suerte, un mutante tendrá un defecto en el gen *A* y un gen *B* normal, y el otro poseerá un gen *A* normal y uno *B* defectuoso. Para ver si ha ocurrido esto, crucemos los dos mutantes en la fase sexual de su ciclo vital. Si las dos cepas no difieren de esta forma, la recombinación de los cromosomas podría producir algunas esporas cuyos genes *A* y *B* fueran normales. En otras palabras, a partir de dos mutantes que son incapaces de producir arginina, obtendremos algunos descendientes que podrían elaborarla. Ocurrió, precisamente tal cosa, cuando se efectuaron las experiencias.
Fue posible explorar el metabolismo de la *Neurospora* de forma algo mas precisa que la expuesta. Por ejemplo, existían tres cepas mutantes distintas, incapaces de producir arginina en un medio ordinario. Una se desarrollaba sólo si se administraba arginina, la segunda crecía si recibía dicha arginina o un compuesto muy similar denominado citrulina. La tercera crecía indistintamente con arginina o con citrulina, e incluso con otro compuesto similar llamado ornitina.
¿Qué conclusión puede deducirse de esto? Bien, podemos suponer que estas tres sustancias son las fases de una secuencia en la que la arginina es el producto final. Cada una requiere una enzima. Primero, la ornitina se forma a partir de algún compuesto más simple con la ayuda de una enzima; luego otra enzima convierte a la ornitina en citrulina y, finalmente, una tercera enzima convierte a la citrulina en arginina. (En realidad, el análisis químico demuestra que cada uno de los tres compuestos es ligeramente más complejo que el anterior.) Ahora bien, un mutante de *Neurospora* que carezca de la enzima que elabora ornitina, pero que posea las otras enzimas, podrá crecer si se le suministra ornitina, pues, a partir de ella, la espora podrá producir la esencial arginina. Por supuesto, también puede crecer con citrulina, a partir de lo cual puede elaborar arginina, y asimismo crecerá también, como es lógico, con la propia arginina. A mayor abundamiento, podemos razonar que la segunda cepa mutante carece de la enzima necesaria para convertir la ornitina en citrulina. Por lo tanto, esta cepa precisará de citrulina, a partir de la que podrá formar arginina, o bien se le deberá administrar la propia arginina.
Finalmente, podemos concluir que el mutante que solamente crece en presencia de arginina ha perdido la enzima (y el gen) responsable de la conversión de la citrulina en arginina.
Por el análisis del comportamiento de las diversas cepas mutantes que fueron capaces de aislar, Beadle y colaboradores fundaron la ciencia de la «genética química». Dilucidaron el proceso de síntesis por organismos de muchos compuestos importantes.
Beadle propuso la que se ha conocido como la «teoría de un gen-una enzima», es decir, que cada gen gobierna la formación de una

sola enzima. Por su labor pionera, Beadle y Tatum compartieron (con Lederberg) el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1958.

Los descubrimientos de Beadle indujeron a los bioquímicos a la búsqueda de pruebas en favor de las modificaciones controladas por los genes en las proteínas, particularmente en mutantes humanos. Y apareció inesperadamente un caso, relacionado con la enfermedad denominada «anemia de células falciformes».

Esta enfermedad había sido comunicada por vez primera en 1910 por un médico de Chicago llamado James Bryan Herrick. Examinando con el microscopio una muestra de sangre de un joven paciente negro, halló que los glóbulos rojos, normalmente redondos, adoptaban formas irregulares, muchos de ellos la forma de media luna de la hoz. Otros médicos empezaron a observar el mismo peculiar fenómeno, casi siempre en pacientes de raza negra.

Por fin, los investigadores llegaron a la conclusión que la anemia falciforme era, en general, una enfermedad hereditaria. Seguía las leyes mendelianas de la herencia. Al parecer, en los pacientes con células falciformes existe un gen que, cuando es heredado a partir de ambos progenitores, produce estos glóbulos rojos deformados. Tales células son incapaces de transportar apropiadamente el oxígeno y tienen una vida excepcionalmente corta, de tal forma que se produce una deficiencia de glóbulos rojos en la sangre. Aquellos que heredan dicho gen a partir de ambos progenitores suelen morir durante la infancia a consecuencia de la enfermedad. Por otra parte, cuando una persona sólo posee un gen determinante de las células falciformes, a partir de uno de sus progenitores, la enfermedad no aparece. El desarrollo de células falciformes sólo se aprecia en aquellas personas sometidas a una escasa concentración de oxígeno, como ocurre en las grandes altitudes. Se considera que tales personas tienen un «carácter de células falciformes», pero no la enfermedad.

Se halló que, aproximadamente, el 9 % de los negros estadounidenses tenían este carácter y que el 0,25 % padecían la enfermedad. En algunas localidades del África Central, cerca de la cuarta parte de la población negra muestra este carácter. Aparentemente, el gen que determina las células falciformes se originó en África a consecuencia de una mutación y fue heredado desde entonces por los individuos de raza africana. Si la enfermedad es letal, ¿por que no ha desaparecido el gen defectuoso? Los estudios llevados a cabo en África durante la década de los cincuenta dieron la respuesta. Al parecer, las personas con el carácter de células falciformes parecen tener una mayor inmunidad a la malaria que los individuos normales. Las células falciformes son, de algún modo, menos adecuadas para contener el parásito de la malaria. Se estima que en las áreas infestadas de malaria, los niños con dicho carácter tienen un 25 % más de probabilidades de sobrevivir hasta la edad en que pueden procrear, que aquellos sin este carácter. Por lo tanto, poseer un solo gen de los que determinan la formación de células falciformes (pero no los dos genes, que causan la anemia) confiere una ventaja. Las dos tendencias opuestas —favorecimiento de la persistencia del gen defectuoso por el efecto protector de uno solo de ellos y desaparición del gen por su efecto letal, cuando es heredado a partir de ambos progenitores— crean un equilibrio que permite la persistencia del gen en un cierto porcentaje de la población. En las regiones donde la malaria no constituye un grave problema, el gen tiende a desaparecer. En América, la incidencia de los genes determinantes de la formación de células falciformes entre los negros puede haber sido originalmente del orden del 25 %.

Aún suponiendo una reducción de, aproximadamente, un 15 % por cruzamiento con individuos de raza no negra, la presente frecuencia de sólo un 9 % demuestra que el gen está desapareciendo. Con toda probabilidad seguirá esta tendencia. Si África llega a verse libre de la malaria, seguramente ocurrirá allí lo mismo.

La significación bioquímica del gen determinante de la formación de células falciformes adquirió de repente una gran importancia en 1949, cuando Linus Pauling y sus colaboradores, en el Instituto de Tecnología de California (donde también estaba trabajando

Beadle), demostraron que los genes afectaban a la hemoglobina de los glóbulos rojos. Las personas con dos genes determinantes de la formación de células falciformes eran incapaces de formar la hemoglobina normal. Pauling demostró este hecho mediante la técnica denominada «electroforesis», método que utiliza una corriente eléctrica para separar las proteínas gracias a las diferencias de la carga eléctrica neta existente en las diversas moléculas proteicas. (La técnica electroforética fue desarrollada por el químico sueco Ame Wilhelm Kaurin Tiselius, quien recibió el premio Nobel de Química en 1948 por esta valiosa contribución.) Pauling, por análisis electroforético, halló que los pacientes con anemia falciforme poseían una hemoglobina anormal (denominada «hemoglobina S»), que podía ser separada de la hemoglobina normal. El tipo normal fue denominado hemoglobina A (de «adulto»), para distinguirla de una hemoglobina en los fetos, denominada hemoglobina F.

Desde 1949, los bioquímicos han descubierto otra serie de hemoglobinas anormales, aparte de aquellas en las células falciformes, y las han diferenciado con letras, existiendo la hemoglobina C hasta la hemoglobina M. Al parecer, los genes responsables de la formación de la hemoglobina han mutado en muchos alelos defectuosos, dando origen cada uno de ellos a una hemoglobina que no realiza tan eficazmente la función de transporte como lo hace la molécula en condiciones ordinarias, pero que quizás es de utilidad en alguna condición no usual. Así, del mismo modo que la hemoglobina S, cuando su presencia ha sido determinada por un solo gen, aumenta la resistencia a la malaria, la hemoglobina C, cuando también es determinada por un solo gen, incrementa la capacidad del organismo para subsistir con cantidades mínimas de hierro.

Puesto que las diversas hemoglobinas anormales difieren en su carga eléctrica, deberán ser distintas de algún modo en la disposición de los aminoácidos en la cadena peptídica, pues el orden de sucesión de los aminoácidos en ésta es responsable de la carga eléctrica de la molécula. Las diferencias suelen ser pequeñas, debido a que las hemoglobinas anormales desarrollan, después de todo, la misma función que la hemoglobina. La esperanza de establecer dónde radica la diferencia en una enorme molécula, de aproximadamente 600 aminoácidos, era muy pequeña. No obstante; el bioquímico alemán residente en Norteamérica Vernon Martin Ingram y sus colaboradores atacaron el problema de la química de las hemoglobinas anormales.

Primero fragmentaron las hemoglobinas A, S y C en péptidos de diversos tamaños, dirigiéndolas con una enzima proteolítica.

Luego separaron los fragmentos de cada hemoglobina mediante la «electroforesis sobre papel», es decir, usando la corriente eléctrica para transportar las moléculas a través de una tira húmeda de papel de filtro, en vez de hacerlo a través de una solución. (Podemos suponerla como un tipo de cromatografía sobre papel en la que se hace uso de la acción separadora de la electricidad.) Una vez los investigadores hubieron realizado esta separación con los fragmentos de cada una de las tres hemoglobinas, hallaron que la única diferencia entre ellas era que un solo péptido aparecía en cada caso en diferentes lugares.

Seguidamente sometieron a este péptido a una ulterior fragmentación y análisis. Observaron que estaba constituido por nueve aminoácidos y que la disposición de éstos era exactamente la misma en las tres hemoglobinas salvo en una posición. Las estructuras correspondientes fueron:

Hemoglobina A: His- Val-Leu-Leu-Tr-Pro-Glu--Glu-Lis
Hemoglobina S: His- Val-Leu-Leu-Tr-Pro-Val-Glu-Lis
Hemoglobina C: His- Val-Leu-Leu-Tr-Pro-Lis-Glu-Lis

Podía apreciarse, pues, que la única diferencia entre las tres hemoglobinas consistía en aquel único aminoácido que ocupaba la posición siete en el péptido: era el ácido glutámico en la hemoglobina A, la valina en la hemoglobina S y la lisina en la hemoglobina C. Ya que el ácido glutámico da origen a una carga negativa, la lisina a una carga positiva y la valina no aporta ninguna carga, no es sorprendente que las tres proteínas se

comporten de manera diferente en la electroforesis, pues su carga global es distinta.
Pero, ¿por qué una modificación tan ligera en la molécula determina un cambio tan drástico en el glóbulo rojo? Bien, una tercera parte del glóbulo rojo normal la constituye la hemoglobina A. Las moléculas de hemoglobina A se hallan tan densamente dispuestas en el interior de la célula, que apenas si tienen espacio para moverse libremente; es decir, se hallan a punto de precipitar la solución. Uno de los factores que determinan que una proteína precipite o no es la naturaleza de su carga. Si todas las proteínas tienen la misma carga neta, se repelen entre sí y no precipitan. Cuanto mayor sea la carga (es decir la repulsión), tanto menos probable será que las proteínas precipiten. En la hemoglobina S, la repulsión intramolecular puede ser algo menor que en la hemoglobina A, y, en su consecuencia, la hemoglobina S será menos soluble y precipitará con mayor facilidad. Cuando una célula falciforme posee un gen normal, este último puede determinar la formación de suficiente hemoglobina A para mantener, aunque a duras penas, la hemoglobina S en solución. Pero cuando los dos genes sean mutantes determinantes de la formación de células falciformes, sólo producirán hemoglobina S. Esta molécula no puede permanecer en solución. Precipita, dando lugar a cristales que de forman y debilitan los hematíes.
Esta teoría explicaría por qué la variación en simplemente un aminoácido, en cada mitad de una molécula constituida por casi 600 aminoácidos, basta para provocar una enfermedad grave, casi siempre con un precoz desenlace fatal.
El albinismo y la anemia falciforme no son los únicos defectos en el ser humano atribuidos a la ausencia de una única enzima o a la mutación de un solo gen. La fenilcetonuria, un defecto hereditario del metabolismo, causa a menudo un retraso mental. Resulta de la carencia de una enzima necesaria para convertir el aminoácido fenilanina en tirosina. Por otra parte, la galactosemia, un trastorno que es causa de cataratas y lesiones en el encéfalo y el hígado, ha sido atribuida a la ausencia de una enzima necesaria para convertir a la galactosa-fosfato en glucosafosfato. Existe un defecto que implica la ausencia de una u otra de las enzimas que controlan la escisión del glucógeno (una especie de almidón) y su conversión en glucosa, y que da como resultado la acumulación anormal de glucógeno en el hígado y en otros lugares, lo que conduce por lo general a una muerte precoz. Éstos son ejemplos de «errores congénitos del metabolismo», es decir, de una ausencia congénita de la capacidad para formar alguna enzima, de importancia más o menos vital, hallada en los seres humanos normales. Este concepto fue introducido por vez primera en Medicina por el médico británico Archibald E. Garrod, en 1908, aunque no recibió mucha atención durante una generación hasta que, a mediados de 1930, el genetista inglés John Burdon Sanderson Haldane llamó de nuevo la atención de los científicos sobre este asunto.
Tales enfermedades suelen ser gobernadas por un alelo recesivo del gen que produce la enzima en cuestión. Cuando sólo se halla ausente uno de los dos genes, el normal puede seguir realizando su función y, por lo general, el individuo es capaz de llevar una vida normal (como en el caso del poseedor del carácter de célula falciforme). En general, los problemas sólo surgen cuando los dos progenitores poseen el mismo desafortunado gen y se produce además la desgracia de que ambos se combinen en un huevo fertilizado. Su hijo será entonces víctima de una especie de ruleta rusa. Probablemente todos nosotros somos portadores de nuestra carga de genes anormales, defectuosos o incluso peligrosos, generalmente enmascarados por genes normales. Se puede ahora comprender por qué los estudiosos de la genética humana están tan preocupados por lo que la radiación, o cualquier otra causa, puede añadir a esta carga.

Ácidos Nucleicos

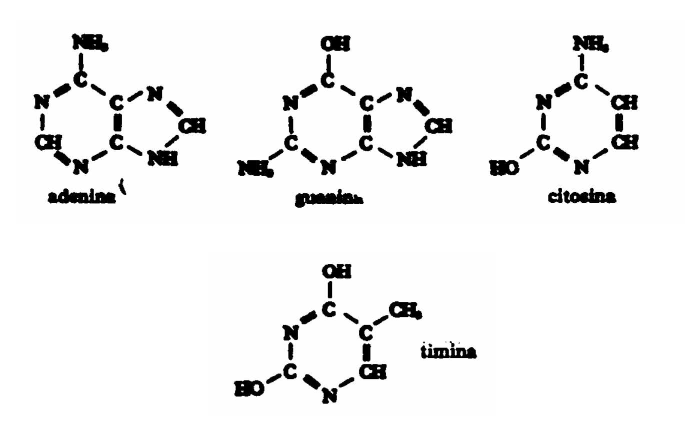
La cuestión realmente llamativa, por lo que respecta a la herencia, no son estas aberraciones espectaculares y en cierto modo raras, sino el hecho mismo de que la herencia siga estrictamente las leyes que las gobiernan. Generación tras generación, milenio tras milenio, los genes se reproducen a sí mismos, exactamente de la

misma manera, Y generan idénticas enzimas, con sólo una ocasional variación accidental de la matriz. Rara vez se desvían de su función hasta el punto de introducir un único aminoácido erróneo en una gran molécula proteica. ¿Cómo consiguen elaborar copias tan exactas de ellos mismos, una y otra vez, con tan sorprendente fidelidad? Un gen está constituido por dos componentes principales. Tal vez la mitad de él sea de naturaleza proteica, pero la otra mitad no lo es. A esta parte no proteica dedicaremos ahora nuestra atención.

En 1869, un bioquímico suizo llamado Friedrich Miescher, mientras descomponía las proteínas de las células con pepsina, descubrió que este fermento no digería el núcleo de la célula. Éste se encogía algo, pero permanecía sustancialmente intacto. Por análisis químico, Miescher descubrió a continuación que el núcleo celular consistía en gran parte de una sustancia que contenía fósforo, en absoluto parecida a una proteína en sus propiedades. Denominó a la sustancia «nucleína». Fue rebautizada posteriormente con el nombre de «ácido nucleico» cuando, veinte años más tarde se apreció que era fuertemente ácida.

Miescher se dedicó al estudio de este nuevo material y, así, llegó a descubrir que los espermatozoides (que tienen muy poco material fuera del núcleo celular) eran particularmente ricos en ácido nucleico. Mientras tanto, el químico alemán Felix Hoppe-Seyler, en cuyos laboratorios Miescher había hecho sus primeros descubrimientos, y que personalmente había confirmado la labor del joven antes de permitirle que fuera publicada, aisló ácido nucleico a partir de las células de levadura. Éste parecía diferir en sus propiedades del material de Miescher, de tal modo que a la variedad de este último se la denominó «ácido timonucleico» (debido a que podía obtenerse con particular facilidad a partir del timo de los animales), y, naturalmente, a la de Hoppe-Seyler se la llamó «ácido nucleico de la levadura». Ya que el ácido timonucleico se obtuvo al principio a partir de las células animales y el ácido nucleico de la levadura sólo a partir de las células vegetales, se supuso, durante un cierto período de tiempo, que esto podía representar una diferencia química general entre los animales y las plantas.

El bioquímico alemán Albrecht Kossel, otro discípulo de Hoppe-Seyler, fue el primero en efectuar una investigación sistemática de la estructura de la molécula del ácido nucleico. Por hidrólisis cuidadosa aisló, a partir de él, una serie de compuestos nitrogenados, que denominó «adenina», «guanina», «citosina» y «timina». En la actualidad se sabe que sus fórmulas son:



A la estructura con dos anillos en los dos primeros compuestos se la denomina «anillo purínico» y al anillo único en las otras dos se lo denomina «anillo pirimidínico». Por lo tanto, la adenina y la guanina son purinas y la citosina y la timina pirimidinas.

Por estas investigaciones, que fueron origen de una fructífera serie de descubrimientos, Kossel recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1910.

En 1911, el bioquímico estadounidense de origen ruso Phoebus Aaron Theodore Levene, un discípulo de Kossel, llevó la investigación a una fase ulterior. Kossel había descubierto en 1891 que los ácidos nucleicos contenían hidratos de carbono, pero entonces Levene demostró que los ácidos nucleicos contenían moléculas de azúcar con 5 átomos de carbono.

(Esto fue, en aquel tiempo, un hallazgo poco usual. Los azúcares mejor conocidos, tales como la glucosa, contenían 6 átomos de

carbono.) Levene dedujo este hecho al observar que las dos variedades de ácido nucleico diferían en la naturaleza del azúcar con 5 átomos de carbono.

El ácido nucleico de la levadura contenía «ribosa», mientras que el ácido timonucleico contenía un azúcar idéntico a la ribosa, salvo por la ausencia de un átomo de oxígeno, de tal modo que este azúcar fue denominado «desoxirribosa». Sus fórmulas son:

ribosa desoxirribosa

En consecuencia, las dos variedades de ácido nucleico fueron denominadas «ácido ribonucleico» (ARN) y «ácido desoxirribonucleico» (ADN).

Además de por sus azúcares, los dos ácidos nucleicos también difieren en una de las pirimidinas. El ARN tiene «uracilo» en lugar de timina. No obstante, el uracilo es muy similar a la timina, como puede apreciarse a partir de la fórmula:

uracilo

Hacia 1934 Levene fue capaz de demostrar que los ácidos nucleicos podían ser escindidos en fragmentos que contenían una purina o una pirimidina, la ribosa o la desoxirribosa, y un grupo fosfato. A esta combinación se la denominó «nucleótido». Levene indicó que la molécula de ácido nucleico estaba constituida por nucleótidos, de la misma manera que una proteína está formada por aminoácidos. Sus estudios cuantitativos le sugirieron que la molécula consistía precisamente de cuatro unidades de nucleótidos, una conteniendo adenina, otra guanina, otra citosina y por último otra timina (en el ADN) o uracilo (en el ARN). Sin embargo, con el tiempo se apreció que lo que Levene había aislado no eran moléculas de ácido nucleico, sino fragmentos de ellas, y, más tarde, a mediados de la década de los cincuenta, los bioquímicos hallaron que los pesos moleculares de los ácidos nucleicos llegaban a ser de hasta 6 millones. Así, pues, realmente, los ácidos nucleicos tienen un tamaño molecular igual o quizá superior al de las proteínas.

La forma exacta en que los nucleótidos están constituidos y engarzados fue confirmada por el bioquímico británico Alexander Robertus Todd, quien sintetizó una serie de nucleótidos a partir de fragmentos más simples y unió cuidadosamente los nucleótidos entre sí, en condiciones que sólo permitían la formación de un determinado tipo de enlace. Por este trabajo recibió el premio Nobel de Química de 1957.

En consecuencia, la estructura general del ácido nucleico podría ser considerada como algo similar a la estructura general de las proteínas. La molécula proteica está constituida por una columna vertebral de naturaleza polipéptida, de la que emergen las cadenas laterales de los aminoácidos individuales. En los ácidos nucleicos, la porción azúcar de un nucleótido se halla unida a la porción azúcar del próximo mediante un grupo fosfato unido a ambas. Así, pues, existe en ellos un «cuerpo de azúcar fosfato», que corre a lo largo de la molécula. Desde ésta se proyectan purinas y pirimidinas, una a partir de cada nucleótido.

Mediante el uso de técnicas de coloración, los investigadores comenzaron a establecer la localización de los ácidos nucleicos en la célula. El químico alemán Robert Feulgen, empleando un colorante rojo que teñía al ADN, pero no al ARN, halló que el ADN estaba localizado en el núcleo celular, específicamente en los cromosomas. Detectó este ácido, no solamente en las células animales, sino también en las vegetales. Además, por tinción del

ARN, demostró que este ácido nucleico existía tanto en las células animales como en las vegetales. En resumen, los ácidos nucleicos eran materiales de distribución universal, que existían en todas las células vivientes.
El bioquímico sueco Torbjörn Caspersson estudió más detalladamente la cuestión, suprimiendo uno de los ácidos nucleicos (mediante una enzima que los escindía en fragmentos solubles, que podían ser eliminados de las células mediante su lavado) y concentrando el otro. Seguidamente fotografió la célula con luz ultravioleta; ya que un ácido nucleico absorbe este tipo de luz con mucha más intensidad de lo que lo hacen los otros componentes celulares, se pudo apreciar claramente la localización del ADN o del ARN, según fuera el que permanecía en la célula. El ADN aparecía localizado sólo en los cromosomas. El ARN se hallaba principalmente en ciertas partículas de citoplasma. Parte del ARN también se encontraba en el «nucleolo», una estructura en el interior del núcleo. (En 1948, el bioquímico Alfred Ezra Mirsky, del «Instituto Rockefeller», demostró que pequeñas cantidades del ARN se hallaban presentes en los cromosomas, mientras que Ruth Sager demostró a su vez que el ADN podía encontrarse en el citoplasma, particularmente en los cloroplastos de las plantas.)
Las fotografías de Caspersson pusieron de manifiesto que el ADN se hallaba localizado en bandas existentes en los cromosomas. ¿Era posible que las moléculas de ADN no fueran otra cosa que genes, los cuales, hasta entonces, sólo habían tenido una existencia vaga y amorfa?
Durante los años cuarenta, los bioquímicos siguieron esta senda con creciente excitación. Consideraban particularmente significativo que la cantidad de ADN en las células del organismo fuera siempre rígidamente constante, salvo en los espermatozoides y óvulos, que contenían la mitad de esta cantidad, lo que era de esperar ya que tenían sólo la mitad del número de cromosomas de las células normales. La cantidad de ARN y de proteína en los cromosomas podía variar considerablemente, pero la cantidad de ADN permanecía fija. Éste, evidentemente, parecía indicar una estrecha relación entre el ADN y los genes.
Por supuesto, existían una serie de hechos que hablaban en contra de esta idea. Por ejemplo, ¿cuál era el papel que desempeñaban las proteínas en los cromosomas? Proteínas de diversas clases se hallaban asociadas a los ácidos nucleicos, formando una combinación denominada «núcleo proteína». Considerando la complejidad de las proteínas y su grande y específica importancia en otras capacidades del organismo, ¿no sería la proteína la parte importante de la molécula? Podría ocurrir que el ácido nucleico no fuera más que un complemento, una porción actuante de la molécula, de forma similar a como lo hace el heme en la hemoglobina.
Pero las proteínas (conocidas como protamina e histona) halladas con más frecuencia en la nucleoproteína aislada resultaron poseer una estructura más bien simple.
Contrariamente, parecía asignarse al ADN una estructura cada vez más compleja. La cola empezaba a perseguir al perro.
En este punto se descubrieron ciertos hechos de importancia, que parecían demostrar que la cola era del perro. En estos descubrimientos se hallaba implicado el neumococo, el bien conocido microorganismo causante de la neumonía. Hacía tiempo que los bacteriólogos estudiaban dos cepas distintas de neumococos desarrollados en el laboratorio; uno con una envoltura lisa, constituida por un hidrato de carbono complejo, la otra carente de revestimiento y, por lo tanto, de aspecto rugoso. En apariencia la cepa rugosa carecía de alguna enzima necesaria para elaborar la cápsula formada por un hidrato de carbono. Sin embargo, un bacteriólogo inglés, llamado Fred Griffith, había descubierto que, si bacterias muertas de la variedad lisa se mezclaban con otras vivas de variedad rugosa y luego se inyectaban a un ratón, los tejidos del ratón inyectado contendrían eventualmente neumococos vivos de la variedad lisa. ¿Cómo podía ocurrir tal cosa? Los neumococos muertos, evidentemente, no habían resucitado. Algo debía de haber transformado a los neumococos rugosos, de tal modo que eran capaces de elaborar un

revestimiento liso. ¿Qué había provocado esta transformación? Sin duda, existía algún tipo de factor aportado por las bacterias muertas de la variedad lisa.

En 1944, tres bioquímicos norteamericanos, Oswald Theodore Avery, Colin Munro Macleod y Maclyn McCarty, identificaron el principio que determinaba esta transformación. Era el ADN. Cuando aislaron a este ácido puro a partir de la cepa lisa y lo adicionaron a neumococos rugosos, aquél bastó para transformar la cepa rugosa en una lisa.

Seguidamente, los investigadores intentaron aislar otros principios transformadores existentes en otras bacterias y que repercutieran sobre otras propiedades y, en cada caso, el principio en cuestión resultó ser una variedad del ADN. La única conclusión plausible era que el ADN podía actuar como un gen. En realidad, varias investigaciones, realizadas particularmente con virus (ver capítulo XIII), habían revelado que la proteína asociada al ADN es casi superflua desde el punto de vista genético: el ADN puede producir efectos genéticos por sí solo, bien en el cromosoma, o —en el caso de una herencia no cromosómica— en ciertos cuerpos citoplasmáticos, tales como los cloroplastos. Si el ADN es la clave de la herencia, debe poseer una estructura compleja, puesto que debe transportar un modelo elaborado, o clave de instrucciones (el «código genético»), para la síntesis de enzimas específicas. Suponiendo que está constituido por las cuatro clases de nucleótidos, éstas no pueden disponerse de una forma regular, tal como 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4... Tal molécula sería demasiado simple como matriz de las enzimas. En realidad, el bioquímico norteamericano Erwin Chargaff y sus colaboradores hallaron, en 1948, la prueba definitiva de que la composición de los ácidos nucleicos era más complicada de lo que se había supuesto. Sus análisis mostraron que las proporciones de las mismas variaban en los diferentes ácidos nucleicos. Todo parecía revelar que las cuatro purinas y pirimidinas se hallaban distribuidas al azar a lo largo de la columna vertebral del ADN de manera similar a como las cadenas laterales de los aminoácidos se hallan dispuestas a lo largo de la columna vertebral peptídica.

Pero, al parecer, ciertos hechos se repetían con regularidad. En cualquier molécula de ADN dada, el número total de purinas parecía ser siempre igual al número total de pirimidinas. Además, el número de adeninas (una purina) era siempre igual al número de timinas (una pirimidina), en tanto que el número de guaninas (la otra purina) siempre era idéntico al de citosinas (la otra pirimidina).

Podríamos simbolizar la adenina con una A, la guanina con una G, la timina con una T y la citosina con una C. En tal caso, las purinas serían A + G y las pirimidinas T + C. Los resultados obtenidos por lo que respecta a la composición de cualquier molécula dada de ADN podrían resumirse de la manera siguiente:

A = T

G = C

A + G = T + C

También se apreciaron características más generales que aparecían con regularidad. Ya en el año 1938, Astbury había señalado que los ácidos nucleicos difractaban los rayos X, lo que constituía un hecho positivo en favor de la existencia de regularidades estructurales en la molécula. El bioquímico británico de origen neocelandés, Maurice Hugh Frederick Wilkins, calculó que estas regularidades se repetían a intervalos considerablemente mayores que la distancia de un nucleótido a otro. Una conclusión lógica era que la molécula de ácido nucleico adoptaba la forma de una hélice, con las espirales de la hélice formando la unidad de repetición apreciada mediante los rayos X. Esta hipótesis era sumamente atractiva debido a que Linus Pauling demostró por aquel entonces la estructura helicoidal de ciertas moléculas proteicas.

En 1953, el físico inglés Francis Harry Compton Crick y sus colaboradores, el bioquímico norteamericano (y, al mismo tiempo, «niño prodigio») James Dewey Watson, reunieron toda la

información disponible y elaboraron un modelo revolucionario de la molécula del ácido nucleico —un modelo que se representó no simplemente como una hélice, sino (y éste era el punto clave) como una hélice doble— dos cuerpos de azúcar-fosfato, que arrollaban de manera similar a una escala en espiral con dos vías de ascensión, dispuestas a lo largo del mismo eje vertical. A partir de cada cadena de azúcar-fosfato emergían las purinas y pirimidinas aproximándose entre sí y formando los peldaños de esta escalera en espiral.

¿Cómo pueden hallarse dispuestas las purinas y pirimidinas a lo largo de estas cadenas paralelas? Para poder ajustar bien una purina con su anillo doble, en un lado siempre debe encarar a una pirimidina, con un solo anillo en el otro, y así constituir una estructura con tres anillos. Dos pirimidinas no se proyectarían a una distancia suficiente como para cubrir la totalidad del espacio entre las cadenas paralelas; en cambio, las dos purinas se superpondrían. Además, una adenina en una cadena siempre se halla encarada a una timina en la otra, y una guanina en una cadena siempre está encarada a una citosina en la otra. De esta forma puede explicarse el hecho que A = T, G = C y A + T = G + C.

Este «modelo de Watson-Crick» de la estructura del ácido nucleico ha resultado ser extraordinariamente fructífero y útil, y Wilkins, Crick y Watson compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1962 en reconocimiento de su labor.

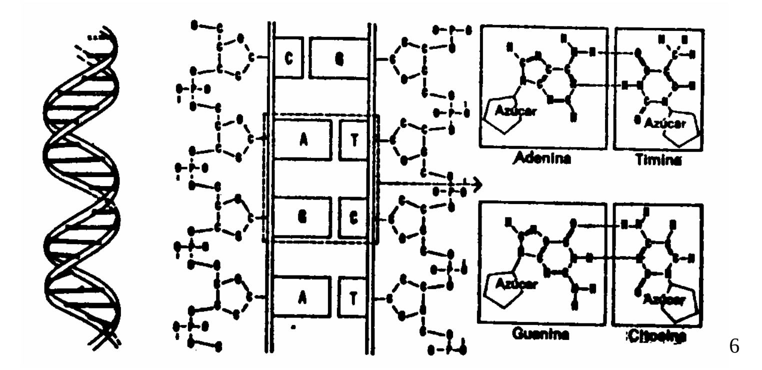
El modelo de Watson-Crick hace posible, por ejemplo, explicar cómo un cromosoma puede duplicarse a sí mismo en el proceso de la división celular. Consideramos el cromosoma como un haz de moléculas de ADN. Las moléculas pueden primero dividirse por separación de las dos hélices desdoblando la hélice doble; podríamos decir que las dos cadenas se desenrollan. Esto puede tener lugar debido a que las purinas y pirimidinas contrapuestas se mantienen unidas entre sí por enlaces de hidrógeno, lo suficientemente débiles como para ser rotos con facilidad. Cada cadena es una hemimolécula, que puede inducir la síntesis de su propio complemento perdido. Donde se encuentre una timina se enlazará una adenina; donde exista la citosina, se unirá una guanina, y así sucesivamente. Todos los materiales para elaborar las unidades y las enzimas necesarias se hallan, por otra parte, en la célula. La hemimolécula simplemente desempeña el papel de un «modelo» para que las unidades se dispongan en el orden apropiado. Las unidades eventualmente se situarán en los lugares adecuados y permanecerán ahí porque ésta es la disposición más estable.

Resumiendo, por lo tanto, cada hemimolécula induce la formación de su propio complemento, manteniéndose la unidad mediante enlaces de hidrógeno. De este modo, se sintetiza de nuevo la molécula total de ADN en su forma de hélice doble, y las dos hemimoléculas en las que se había dividido la molécula original forman así dos moléculas donde antes sólo existía una. Tal proceso, realizado en toda la longitud del ADN a lo largo de un cromosoma, creará dos cromosomas que son exactamente iguales y copias perfectas del cromosoma madre original. En ocasiones algo no se produce de un modo correcto: el impacto de una partícula subatómica o de una radiación de elevada energía, o también la intervención de ciertas sustancias químicas, puede determinar una imperfección de un lugar u otro del nuevo cromosoma. El resultado es una mutación.

Se han ido acumulando pruebas en favor de este mecanismo de replicación. Los estudios con isótopos radiactivos, donde se emplea nitrógeno pesado para marcar a los cromosomas y se sigue el destino del material marcado durante la división celular, tienden a corroborar la teoría. Además, se han identificado algunas de las enzimas importantes implicadas en el proceso de replicación.

En 1955, el bioquímico español Severo Ochoa aisló a partir de una bacteria *(Aztobacter vinelandii)* una enzima que era capaz de catalizar la formación del ADN a partir de los nucleótidos. En 1956, un discípulo de Ochoa, Arthur Kornberg, aisló otra enzima (a partir de la bacteria *Escherichia coli),* que catalizaba la formación del ADN a partir de nucleótidos, y Kornberg hizo lo mismo con el ADN. (Los dos investigadores compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1959.) Kornberg

también mostró que su enzima, en presencia de una pequeña cantidad del ADN natural que servía como molde, podía catalizar la formación de una molécula que parecía ser idéntica al ADN natural.
En 1965, Sol Spiegelman, de la Universidad de Illinois, utilizó el ARN de un virus vivo (la más elemental de las cosas vivientes) y produjo moléculas adicionales de esa especie. Puesto que estas moléculas adicionales poseyeron las propiedades esenciales del virus, aquello fue lo más parecido hasta entonces a la creación de vida mediante el tubo de ensayo. En 1967, Kornberg y otros lo imitaron, utilizando el ADN de un virus vivo como módulo.
La cantidad de ADN asociada a las manifestaciones más elementales de la vida es mínima —una simple molécula en un virus— y aún se la puede empequeñecer. En 1967, Spiegelman indujo al ácido nucleico de un virus a replicar y seleccionar muestras a intervalos cada vez más breves, a medida que se producían las réplicas. Por ese medio contó con determinadas moléculas que le permitieron dar fin al trabajo de forma asombrosamente rápida.., porque eran más pequeñas que las normales. Lo cierto fue que redujo el virus a una sexta parte del tamaño normal y multiplicó por quince su capacidad para la réplica.



[6]

Aunque el ADN es el que replica en las células, muchos de los virus más simples (subcelulares) contienen solamente ARN. Las moléculas ARN, en doble hilera, replican en esos virus. El ARN de las células forma una sola hilera y no replica.
Sin embargo, la estructura de una sola hilera y la réplica no se excluyen mutuamente. El biofísico norteamericano Robert Louis Sinsheimer descubrió un rastro de virus que contenía ADN formando una sola hilera. La molécula ADN tendría que replicar por sí misma, pero, ¿cómo lo haría con una sola hilera? La respuesta no fue difícil. La cadena simple induciría la producción de su propio complemento y éste induciría después la producción del «complemento del complemento», es decir, una copia de la cadena original.
Es evidente que la disposición en una sola cadena es menos eficiente que la disposición en cadena doble (motivo por el cual probablemente la primera existe sólo en ciertos virus muy simples, y la última en todas las restantes criaturas vivientes). En efecto, en primer lugar, una cadena sencilla debe replicarse a sí misma en

---

[6] Modelo de la molécula de ácido nucleico. El dibujo a la izquierda muestra la doble hélice; en el centro se muestra con mayor detalle una porción de ella (omitiendo los átomos de hidrógeno); a la derecha se representan las combinaciones de nucleótidos.

dos fases sucesivas, mientras que la cadena doble lo hace en una sola fase. Segundo, ahora parece ser que sólo una de las cadenas de la molécula de ADN es la estructura operante, el borde cortante de la molécula, por así decirlo. Su complemento puede imaginarse como una vaina protectora del borde cortante. La cadena doble representa el borde cortante protegido por la vaina, excepto cuando aquél está realizando su función; la cadena simple es el borde cortante en todo momento expuesto y sometido a un posible accidente que lo haga romo.

Sin embargo, la replicación simplemente determina la formación de una molécula de ADN. ¿Cómo realiza su trabajo, cuál es el de determinar la síntesis de una enzima específica, es decir, de una molécula proteica específica? Para formar una proteína, la molécula de ADN tiene que determinar la disposición de los aminoácidos en un cierto orden en una molécula constituida por cientos o miles de unidades. Para cada posición debe elegir el aminoácido correcto de entre, aproximadamente, 20 aminoácidos distintos. Si hubiera 20 unidades correspondientes en la molécula de ADN, el problema sería fácil. Pero el ADN está constituido por sólo cuatro sillares distintos: los cuatro nucleótidos.

Reflexionando a este respecto, el astrónomo George Gamow sugirió en 1954 que los nucleótidos, en diversas combinaciones, pueden usarse como un código «genético» (de manera similar a como el punto y el guión en la clave Morse pueden combinarse de diversas maneras para representar las letras del alfabeto, los números, etc.).

Si se toman los cuatro nucleótidos distintos (A, G, C, T), de dos en dos, existirán 4 x 4, ó 16 posibles combinaciones (AA, AG, AC, AT, GA, GG, GC, GT, CA, CG, CC, CT, TA, TG, TC y TT). Éstas no son suficientes. Si se toman de tres en tres, existirán 4 X 4 X 4, ó 64 combinaciones distintas, más que suficientes. (El lector puede distraerse anotando las diferentes combinaciones y viendo si puede hallar la 65.[a.]) Parece como si cada diferente «terceto de nucleótidos» representara un aminoácido particular. En vista del gran número de diferentes tercetos posibles, puede ocurrir muy bien que dos, o aún tres, diferentes tercetos representen un aminoácido particular. En este caso, la clase venética sería «degenerada», según la terminología de los criptógrafos.

Esto plantea dos problemas fundamentales: ¿Qué terceto (o tercetos) corresponde a cada aminoácido? ¿Y de que modo la información del terceto (que fue encerrada cuidadosamente en el núcleo, allí donde sólo se hallará el ADN) alcanza los lugares de formación de enzimas que se encuentran en el citoplasma?

Abordemos primeramente el segundo problema y consideremos las sospechas que han recaído sobre el ARN como posible sustancia transmisora de la información. Su estructura es muy similar a la del ADN, con diferencias que no afectan a la clave genética. El ARN tiene ribosa en lugar de desoxirribosa (un átomo de oxígeno más por nucleótido) y uracilo en lugar de timina (un grupo metílico, CH_3, menos por nucleótido). Además, el ARN se halla presente principalmente en el citoplasma, pero también, en una pequeña proporción, en los propios cromosomas.

No fue difícil ver, y posteriormente demostrar, lo que ocurría en realidad. Cuando las dos cadenas enrolladas de la molécula de ADN se desenrollan, una de estas cadenas (siempre la misma, el borde cortante) replica su estructura, no sobre los nucleótidos que forman una molécula de ADN, sino sobre aquellos que forman una molécula de ARN. En este caso, la adenina de la cadena de ADN no se unirá a los nucleótidos de la timina, sino, por el contrario, a los nucleótidos del uracilo. La molécula de ARN resultante, que transporta la clave genética impresa sobre su estructura nucleotídica, puede luego abandonar el núcleo y penetrar en el citoplasma.

Ya que transmite el «mensaje» del ADN, ha sido de nominado «ARN-mensajero» o simplemente «mARN».

El bioquímico rumano George Emil Paladeo gracias a una cuidadosa investigación con el microscopio electrónico, demostró, en 1956, que el lugar de producción de enzimas en el citoplasma eran unas minúsculas partículas, ricas en ARN y por lo tanto denominadas «ribosomas». En una célula bacteriana hay 15.000 ribosomas, quizá diez veces más que en una célula de mamífero.

Son las más pequeñas de las partículas subcelulares u «orgánulas». Se pudo determinar pronto que el ARN mensajero, que transporta la clave genética en su estructura, se dirige hacia los ribosomas y se sitúa en uno o más de ellos; se descubrió asimismo que la síntesis de la proteína se realiza en los ribosomas.
La siguiente etapa fue salvada por el bioquímico norteamericano Mahlon Busch Hoagland, quien investigó activamente el problema del mARN; demostró que en el citoplasma existía una variedad de pequeñas moléculas de ARN, que podían denominarse «ARN-soluble» o «sARN», debido a que sus pequeñas dimensiones les permitían hallarse libremente disueltas en el líquido citoplasmático.
En un extremo de cada molécula sARN había, un terceto especial de nucleótidos que se correspondía exactamente con otro terceto complementario en algún lugar de la cadena mARN. Es decir, si el terceto sARN estaba compuesto por AGC se ajustaría firme y exclusivamente al terceto UCG de la mARN. En el otro extremo de la molécula sARN había un punto donde ésta se combinaría con un aminoácido específico, y también exclusivamente. Así, pues, en cada molécula sARN el terceto de un extremo comportaba un aminoácido específico en el otro. Por consiguiente un terceto complementario en la mARN significaba que sólo se adheriría allí una determinada molécula sARN portadora de cierta molécula de aminoácidos. Un número muy elevado de moléculas sARN se adherirían consecutivamente en toda la línea a los tercetos constitutivos de la estructura mARN (tercetos que se habían moldeado justamente en la molécula ADN de un determinado gen). Entonces, una vez alineados adecuadamente todos los aminoácidos, se les podría acoplar con facilidad para formar una molécula de enzima.
Como quiera que la información transmitida desde la mensajera ARN es transferible por ese conducto a la molécula proteínica de la enzima, se ha dado en llamarla «transferencia-ARN», denominación que se ha generalizado hoy día.
En 1964, un equipo dirigido por el bioquímico norteamericano Robert W. Holley analizó minuciosamente la molécula «transferencia-ARN» de la alanina (la transferencia-ARN que se adhiere a la alanina, raíz de diversos aminoácidos). Se empleó el método Sanger, es decir, de integración de la molécula en pequeños fragmentos mediante las apropiadas enzimas, para analizar seguidamente esos fragmentos y deducir cómo encajaban unos con otros. Se averiguó que la transferencia-ARN de la alanina —el primer ácido nucleico de formación natural que se analizó totalmente— está constituido por una cadena de 77 nucleótidos. Entre éstos no figuran solamente los cuatro nucleótidos característicos del ARN (A, G. C y U), sino también otros siete estrechamente asociados a ellos.
Al principio se supuso que la cadena lineal de la transferencia-ARN se doblaría por el centro como una horquilla y los dos extremos se entrecruzarían formando una doble hélice. Sin embargo, la estructura de la transferencia-ARN de alanina no se adaptó a ese modelo. En su lugar pareció estar constituido por tres bucles que le daban el aspecto de un trébol trifoliado asimétrico. En años subsiguientes se analizaron concienzudamente otras moléculas de transferencia-ARN y todas ellas parecieron tener la misma estructura de trébol trifoliado. Como recompensa por su trabajo, Holley recibió una participación en el premio Nobel de Medicina y Fisiología el año 1968.
Por ese medio la estructura de un gen controla la síntesis de una estructura específica. Queda todavía mucho por hacer, pues los genes no siempre organizan la producción de enzimas con carácter continuo e intensivo.
Puede ser que el gen haga una labor eficiente durante algún tiempo y luego aminore el ritmo o incluso permanezca inactivo. Algunas células fabrican proteína a gran velocidad y cuando alcanzan su capacidad máxima combinan unos 15 millones de aminoácidos por cromosoma cada minuto; otras lo hacen lentamente, y aún hay otras que apenas trabajan; sin embargo, todas las células de un organismo determinado tienen la misma organización génica. Por añadidura, cada tipo de células en el cuerpo está sumamente especializado, con funciones y comportamiento característicos. Una célula individual puede

sintetizar una proteína determinada con gran rapidez unas veces y pausadamente otras. Pero, por otro lado, todas ellas presentan la misma organización génica en cualquier momento.

[7]

Primera posición	Segunda posición				Tercera posición
	U	C	A	G	
U	Fe	Ser	Tir	Cis	U
	Fe	Ser	Tir	Cis	C
	Leu	Ser	(«full stop » normal)	«full stop»	A
	Leu	Ser	(«full stop» menos corriente)	Trip	G
C	Leu	Pro	His	Arg	U
	Leu	Pro	His	Arg	C
	Leu	Pro	Glun	Arg	A
	Leu	Pro	Glun	Arg	G
A	Ileu	Tre	Aspn	Ser	U
	Ileu	Tre	Aspn	Ser	C
	Ileu?	Tre	Lis	Arg	A
	Met (letra mayúscula)	Tre	Lis	Arg	G
G	Val	Ala	Asp	Gli	U
	Val	Ala	Asp	Gli	C
	Val	Ala	Glu	Gli	A
	Val (letra mayúscula)	Ala	Glu	Gli	G

Es evidente que las células tienen métodos para interceptar u abrir paso a las moléculas ADN de los cromosomas. Mediante ese esquema de interceptación y desobstrucción, células diferentes pero con idénticos modelos génicos pueden producir distintas combinaciones de proteínas, mientras que una célula particular con un modelo génico inalterable produce combinaciones distintas muy raras veces.

En 1961, Jacob y Monod opinaron que cada gen tiene su propio represor, cifrado por un «gen regulador». Este represor —dependiente de su geometría que puede alterarse dentro de la célula según las circunstancias— interceptará o dará paso libre al gen. En 1967 se consiguió aislar ese represor y se descubrió que era una pequeña proteína. Jacob y Monod, junto con un colaborador, André Michael Lwoff, recibieron por su trabajo el premio Nobel de Medicina y Fisiología el año 1965.

Ahora bien, la afluencia de información no sigue una dirección única, es decir, desde el gen a la enzima. Hay también una «realimentación». Así. Pues, hay un gen que promueve la formación de una enzima, cataliza una reacción y transforma el aminoácido treonina en otro aminoácido, la isoleucina. La presencia de esta isoleucina sirve por alguna razón desconocida

[7] Código genético. En la primera columna de la izquierda están las iniciales de las cuatro bases ARN (uracilo, citosina, adenina, guanina) que representan la primera letra del tercero; la segunda letra se representa por las iniciales de la columna superior, en tanto que la tercera aunque no menos importante letra aparece en la columna final de la derecha. Por ejemplo, la tirosina (Tir) se codifica tanto como UAU o UAC. Los aminoácidos codificados por cada terceto se abrevian del modo siguiente: Fe, fenilalanina; Leu, leucina; Ileu, isoleucina; Met, metionina,. Val, valina; Ser, serina; Pro, prolina; Tre, treonina; Ala, alanina; Tir, tirosina; His, histidina: Glun, glutamina; Aspn, asparagina; lis, lisina; asp, ácido aspártico; Glu, ácido glutámico; Cis, cisteína; Trip, triptófano; Arg, arginina; Gli, glicina.

para activar al represor que entonces reprime paulatinamente la acción del mismo gen que ha producido la específica enzima causante de esa presencia. En otras palabras, cuanto más aumenta la concentración de isoleucina menos cantidad se forma; si la concentración disminuye, el gen tendrá paso libre y se formará más isoleucina. La maquinaria química dentro de la célula —genes, represores, enzimas, «productos acabados»— es normalmente compleja y sus interrelaciones muy intrincadas. No parece que sea posible por ahora descubrir rápida y totalmente ese esquema. (Véase página anterior.)

Pero, preguntémonos entretanto acerca de otra cuestión: ¿Con qué aminoácido se corresponde cada terceto? El comienzo de esa respuesta llegó en 1961, gracias al trabajo de los bioquímicos norteamericanos Marshall Warren Nirenberg y J. Heinrich Matthaei. Ambos empezaron utilizando el ácido nucleico sintético, elaborado con arreglo al sistema de Ochoa, es decir, partiendo exclusivamente de los nucleótidos uracilos. Este «ácido poliuridílico» estaba constituido por una larga cadena de ...UUUUUUU..., y sólo podía poseer un terceto, el UUU. Nirenberg y Mattahaei agregaron este ácido poliuridílico a un sistema que contenía varios aminoácidos, enzimas, ribosomas y todos los restantes componentes necesarios para sintetizar las proteínas. De esa mezcla se desprendió una proteína constituida únicamente por el aminoácido fenilalanina, lo cual significó que el UUU equivalía a la fenilalanina. Así se elaboró el primer apartado del «diccionario de los tercetos».

El siguiente paso fue preparar un nucleótido en cuya composición preponderaran los nucleótidos de uridina más una pequeña porción de adenina. Ello significó que, junto con el terceto UUU, podría aparecer ocasionalmente un codon UVA o AUU o UAU. Ochoa y Nirenberg demostraron que, en tal caso, la proteína formada era mayormente fenilalanina, si bien solía contener asimismo leucina, isoleucina y tirosina, es decir, otros tres aminoácidos.

Mediante métodos similares a ése se amplió progresivamente el diccionario. Se comprobó que el código adolecía de cierta redundancia, pues, por ejemplo, GAU y GAC podían representar el ácido aspártico y la glicina estaba representada nada menos que por GUU, GAU, GUC GUA y GUG. Por añadidura, hubieron algunas puntualizaciones. El terceto AUG no representaba únicamente el aminoácido metionina, sino que al parecer comportaba también el comienzo de una cadena. Era una «letra mayúscula» por así decirlo. Asimismo UAA y UAC marcaban el fin de una cadena: eran «períodos».

En 1967 se completó el diccionario. Nirenberg y su colaborador, el químico americano de origen indio Har Gobind Khorana (así como Holley) fueron galardonados con el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1968.

Las posibles implicaciones de una verdadera comprensión de la clave genética y de la manera como ésta es modificada de un tejido a otro y de una célula a otra, causan vértigos. Probablemente no ha ocurrido nada tan excitante en las ciencias biológicas en todo un siglo.

El Origen De La Vida

Una vez dilucidada la estructura y significación de las moléculas de ácido nucleico, nos encontramos tan próximos a los fundamentos de la vida como en la actualidad nos es posible. Aquí seguramente se halla la sustancia primigenia de la propia vida. Sin el ADN, los organismos vivos no podrían reproducirse, y la vida, tal como la conocemos, no podría haberse iniciado. Todas las sustancias de la materia viva —las enzimas y todas las demás cuya producción es catalizada por las enzimas— dependen en última instancia del ADN. Así, pues, ¿cómo se inició el ADN y la vida? Ésta es una pregunta que la Ciencia siempre ha titubeado en responder. En los últimos años, un libro, titulado precisamente *El origen de la vida,* del bioquímico ruso A. I. Oparin, ha permitido centrar mucho más el problema. El libro fue publicado en la Unión Soviética en 1924, y su traducción inglesa apareció en 1936. En él, el problema del origen de la vida es tratado por vez primera con detalle, a partir de un punto de vista totalmente científico.

La mayor parte de las culturas primitivas humanas desarrollaron mitos sobre la creación de los primeros seres humanos (y algunas veces también de otras formas de vida) por los dioses o los demonios. Sin embargo, la formación de la propia vida fue rara vez considerada como una prerrogativa únicamente divina. Al menos, las formas más inferiores de vida podrían originarse de forma espontánea, a partir de la materia inerte, sin la intervención sobrenatural. Por ejemplo, los insectos y gusanos podían originarse de la carne en descomposición, las ranas a partir del lodo, los ratones a partir del trigo roído. Esta idea se basaba en la observación del mundo real, pues la carne descompuesta, para elegir el ejemplo más evidente, daba indudablemente origen a cresas. Fue muy natural suponer que dichas cresas se formaban a partir de la carne.

Aristóteles creyó en la existencia de la «generación espontánea». Así lo hicieron también grandes teólogos de la Edad Media, tales como santo Tomás de Aquino. Igualmente abundaron en esta opinión William Harvey e Isaac Newton. Después de todo, la evidencia que se ofrece a nuestros propios ojos es difícil de rechazar.

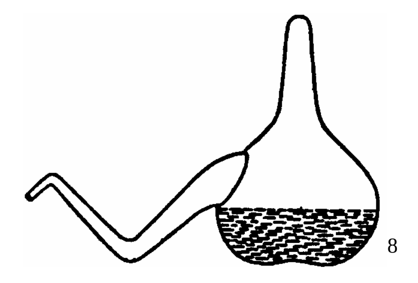
El primero en poner en tela de juicio esta creencia y someterla a una experimentación fue el médico italiano Francesco Redi. En 1668, decidió comprobar si las cresas realmente se formaban a partir de la carne en descomposición. Colocó fragmentos de carne en una serie de tarros y luego recubrió algunos de ellos con una fina tela, dejando a los restantes totalmente al descubierto. Las cresas se desarrollaron sólo en la carne de los tarros descubiertos, a los que tenían libre acceso las moscas. Redi llegó a la conclusión que las cresas se habían originado a partir de huevos microscópicamente pequeños, depositados sobre la carne por las moscas. Sin las moscas y sus correspondientes huevos, insistió, la carne nunca podría haber producido cresas, independientemente del tiempo que se estuviera descomponiendo y pudriendo.

Los experimentadores que siguieron a Redi confirmaron este hecho, y murió así la creencia de que ciertos organismos visibles se originaban a partir de la materia muerta. Pero, cuando se descubrieron los microbios, poco después de la época de Redi, muchos científicos decidieron que al menos estas formas de vida debían de proceder de la materia muerta. Incluso en tarros recubiertos por una fina tela, la carne pronto empezaba a contener numerosos microorganismos. Durante los dos siglos que siguieron a las experiencias de Redi, permaneció aún viva la creencia de la posibilidad de la generación espontánea de los microorganismos.

Fue otro italiano, el naturalista Lazzaro Spallanzani, quien por vez primera puso seriamente en duda esta hipótesis. En 1765, dispuso dos series de recipientes que contenían pan. Una de estas series la mantuvo en contacto con el aire. La otra, a la que había hervido para matar a todos los organismos presentes, fue cerrada, al objeto de evitar que cualquier organismo que pudiera hallarse suspendido en el aire entrara en contacto con el pan. El pan de los recipientes de la primera serie pronto contuvo microorganismos, pero el pan hervido y aislado permaneció estéril. Esto demostró, para satisfacción de Spallanzani, que incluso la vida microscópica no se originaba a partir de la materia inanimada. Incluso aisló una bacteria y afirmó que se había dividido en dos bacterias.

Los defensores de la generación espontánea no estaban convencidos. Mantenían que la ebullición destruía algún «principio vital» y que éste era el motivo por el cual no se desarrollaba vida microscópica en los recipientes cerrados y hervidos de Spallanzani. Pasteur zanjó la cuestión, al parecer de forma definitiva. Ideó un recipiente con un largo cuello de cisne, que presentaba la forma de una S horizontal. Por la abertura no tapada, el aire podía penetrar en el recipiente, pero no lo podían hacer las partículas de polvo y los microorganismos, ya que el cuello curvado actuaba como una trampa, igual que el sifón de una alcantarilla. Pasteur introdujo algo de pan en el recipiente, conectó el cuello en forma de S, hirvió el caldo hasta emitir vapor (para matar cualquier microorganismo en el cuello, así como en el caldo) y esperó a ver qué ocurría. El caldo permaneció estéril. Así, pues, no existía ningún principio vital en el aire. Aparentemente, la demostración de Pasteur puso fin de forma definitiva a la teoría de la generación espontánea.

Todo esto sembró un germen de intranquilidad en los científicos. Después de todo, ¿cómo se había originado la vida, si no era por creación divina o por generación espontánea? Hacia finales del siglo XIX, algunos teóricos adoptaron la otra posición extrema, al considerar que la vida era eterna. La teoría más popular fue la propuesta por Svante Arrhenius (el químico que había desarrollado el concepto de la ionización). En 1907 publicó el libro titulado *La creación de mundos,* en el cual describía un Universo donde la vida siempre había existido y que emigraba a través del espacio, colonizando continuamente nuevos planetas. Viajaba en forma de esporas, que escapaban de la atmósfera de un planeta por movimiento al azar y luego eran impulsadas a través del espacio por la presión de la luz procedente del sol.


[8]

En modo alguno debe despreciarse esta presión de la luz como una posible fuerza impulsadora. La existencia de la presión de radiación había sido predicha en primer lugar por Maxwell, a partir de bases teóricas, y, en 1899, fue demostrada experimentalmente por el físico ruso Piotr Nikolaievich Lebedev. Según Arrhenius, estas esporas se desplazarían impulsadas por la radiación luminosa a través de los espacios interestelares, y lo harían hasta morir o caer en algún planeta, donde podrían dar lugar a vida activa y competir con formas de vida ya existentes, o inocular vida al planeta si éste estaba inhabitado pero era habitable.

A primera vista, esta teoría ofrece un cierto atractivo. Las esporas bacterianas, protegidas por un grueso revestimiento, son muy resistentes al frío y a la deshidratación, y es concebible que se conserven durante un prolongado período de tiempo en el vacío del espacio. Asimismo tienen las dimensiones apropiadas para ser más afectadas por la presión externa de la radiación solar, que por el empuje centrípeto de su gravedad. Pero la sugerencia de Arrhenius se desmoronó ante el obstáculo, que representaba la luz ultravioleta. En 1910, los investigadores observaron que dicha luz mataba rápidamente las esporas bacterianas; y en los espacios interplanetarios la luz ultravioleta del sol es muy intensa (por no hablar de otras radiaciones destructoras, tales como los rayos cósmicos, los rayos X solares, y zonas cargadas de partículas, por ejemplo los cinturones de Van Allen que rodean a la Tierra). Concebiblemente pueden existir en algún lugar esporas que sean resistentes a las radiaciones, pero las esporas constituidas por proteínas y ácido nucleico, tales como las que nosotros conocemos, evidentemente no soportarían la prueba que aquéllas implican.

Desde luego, en 1966, algunos microorganismos particularmente resistentes a bordo de la cápsula *Géminis IX* quedaron expuestos a la radiación del espacio cósmico y sobrevivieron seis horas bajo los demoledores rayos solares no tamizados por una capa atmosférica. Pero aquí no estamos hablando de exposición durante algunas horas, sino durante meses y años.

Podríamos denominar «Atmósfera I» a esa atmósfera altamente hidrogenada. Mediante la fotodisociación se transformaría lentamente en una atmósfera de anhídrido carbónico y nitrógeno o «Atmósfera II». Después de eso se formaría una capa ozónica en la atmósfera superior y el cambio espontáneo subsistiría. Habrá sido posible, entonces, que la vida se haya formado en una u otra de esas atmósferas primigenias? Consideremos, por ejemplo, la Atmósfera II. El anhídrido carbónico es soluble en agua, y mientras la Tierra estuviese bañada por la Atmósfera II el océano

[8] Matraz de Pasteur para el experimento sobre la generación espontánea.

sería un inmenso depósito de agua carbónica. La radiación ultravioleta desde el Sol al nivel del mar sería mucho más intensa que hoy día mientras la Atmósfera II abordase las últimas fases de su formación y antes de que la capa ozónica ocupara definitivamente su lugar. Lo que es más, el suelo terrestre tendría entonces una cantidad mucho mayor que ahora de átomos radiactivos. ¿Pudo haber germinado en tales condiciones la materia orgánica?

Según opina H. C. Urey, la vida comenzó con la Atmósfera I. En 1952, Stanley Lloyd Miller, por entonces un universitario recién graduado que trabajaba en los laboratorios Urey, hizo circular agua, amoníaco, metano e hidrógeno a través de una descarga eléctrica (para simular la radiación ultravioleta del Sol). Al cabo de una semana analizó su solución por medio de la cromatografía y descubrió que, aparte de las sustancias elementales sin átomos de nitrógeno, contenía también glicina y alanina, los dos aminoácidos más simples, así como rastros de uno o dos más complicados.

El experimento de Miller fue significativo por muchas razones. En primer lugar, esos compuestos se habían formado con rapidez y en cantidades sorprendentes. Una sexta parte del metano empleado para iniciar la operación había pasado a formar compuestos orgánicos más complejos, aunque desde entonces había transcurrido una semana justa.

Además, las moléculas orgánicas constituidas mediante el experimento de Miller eran del tipo también presente en los tejidos vivientes. El camino seguido por las moléculas simples a medida que ganaban complejidad, parecía apuntar directamente hacia la vida. Esa marcada querencia hacia la vida se manifestó de forma consistente en ulteriores experimentos más elaborados. Apenas se formaron en cantidad apreciable, las moléculas no tomaron ni por un instante la dirección desusada de lo exánime.

Así, por ejemplo. P. H. Abelson asumió el trabajo inicial de Miller, practicando varios experimentos similares con materias básicas integradas por gases y combinaciones diferentes. Resultó que mientras empleó moléculas conteniendo átomos de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno, se formaron los aminoácidos que se encuentran normalmente en las proteínas. Además, las descargas eléctricas tampoco fueron la única fuente eficaz de energía. En 1949, dos científicos alemanes, Wilhelm Groth y H. von Weyssenhoff, proyectaron un experimento en donde se podía utilizar como alternativa la luz ultravioleta; también obtuvieron aminoácidos.

Por si se dudara todavía de que la querencia hacia la vida fuera la línea de menor resistencia, en la última década de los años sesenta se descubrieron moléculas cada vez más complicadas que representaban las primeras fases de esa evolución en las nubes gaseosas del espacio exterior (véase capítulo II)[9]. Bien pudiera ser, pues, que cuando la Tierra empezara a tomar forma con las nubes de polvo y gas, estuviese ya en sus primeras fases la creación de moléculas complejas.

Tal vez la Tierra haya tenido una reserva de aminoácidos en su primera formación. Allá por 1970 se encontraron pruebas a favor de esa hipótesis. El bioquímico cingalés Cyril Ponnamperuma examinó un meteorito que había caído en Australia el 28 de septiembre de 1969. Concienzudos análisis evidenciaron leves vestigios de cinco aminoácidos: glicina, alanina, ácido glutámico, valina y prolina. No hubo actividad óptica en estos aminoácidos, por tanto no se formaron mediante procesos vitales (de ahí que su presencia no fuera el resultado de la contaminación terrestre) sino mediante procesos químicos similares a los que tuvieron lugar en la probeta de Miller.

¿Podrían progresar los químicos en el laboratorio más allá de la fase «aminoácido»? Un método para lograrlo consistiría en comenzar con mayores muestras de materias primas y someterlas a la energía durante períodos más largos. Ello produciría un número creciente de productos cada vez más complicados, pero

---

[9] Capítulo II de Introducción a la Ciencia. Volumen I: Ciencias físicas. (N. de Xixoxux)

las mezclas de tales productos adquirirían incesantemente mayor complejidad y ofrecería creciente resistencia al análisis.
En su lugar, los químicos principiaron por unas fases ulteriores, y emplearon como nuevas materias primas los productos formados en experimentos preliminares. Así, por ejemplo, entre los productos de Miller figuró el ácido cianhídrico. En 1961, el bioquímico español Juan Oró agregó ácido cianhídrico a la mezcla básica. Obtuvo una mezcla más rica en aminoácidos e incluso algunos péptidos cortos. Asimismo formó purinas, en particular la adenina, un componente vital de los ácidos nucleicos.
En 1962, Oró empleó formaldehído como una de sus materias primas y produjo ribosa y desoxirribosa, asimismo componentes de los ácidos nucleicos.
En realidad, en 1963, Cyril Ponnamperuma efectuó experiencias similares a aquellas de Miller, utilizando haces de electrones como fuente de energía, y descubrió que se formaba adenina. Junto con Ruth Mariner y Carl Sagan, añadió adenina a una solución de ribosa y, bajo la acción de la luz ultravioleta, se formó «adenosina», una molécula formada de adenina y ribosa unidas entre sí. Si también se hallaba presente el fosfato, éste se unía para formar el trifosfato de adenosina (TFA), que, como se indicó en el capítulo XI, es esencial para los mecanismos de intercambio de energía en los tejidos vivos. En 1965 se consiguió un «dinucleótido», es decir, dos cadenas juntas de nucleótidos.
Pueden originarse productos adicionales, si sustancias tales como la cianamida ($CNNH_2$) y el etano (CH_3CH_3) —sustancias que pueden muy bien haberse hallado presentes en la era primordial— se añaden a las mezclas empleadas por los diversos experimentadores en este campo. Así, pues, no existe realmente un problema, ya que las modificaciones químicas y físicas normales acaecidas en el océano y la atmósfera primordiales pueden haber actuado de tal modo que se elaboraran proteínas y ácidos nucleicos.
Cualquier compuesto formado en el océano sin vida tendería a permanecer en él y a acumularse. No existían organismos grandes o pequeños, que los consumieran o causaran su descomposición. Además, en la atmósfera original no existía oxígeno libre que oxidara o degradara las moléculas. Los únicos factores importantes que tendían a degradar las moléculas complejas habrían sido las muy intensas radiaciones ultravioleta y de origen radiactivo que las generaron. Pero las corrientes oceánicas podrían haber transportado gran parte del material a un puerto seguro, las profundidades medias en el mar, lejos de la superficie irradiada por los rayos ultravioleta y del suelo oceánico radiactivo. Además, Ponnamperuma y sus colaboradores han calculado que casi el 1 % del océano original puede haber estado constituido por esos compuestos orgánicos formados. Si así fuera, esto representaría una masa de más de mil billones de toneladas. Evidentemente, ésta es una cantidad importante para que las fuerzas naturales puedan operar en ella, y en tal enorme masa incluso sustancias de la máxima complejidad posible podrían haber sido elaboradas en un período de tiempo no demasiado largo (particularmente considerando que, para este fin, se dispone de dos mil millones de años). Por lo tanto, no existe una barrera lógica que impida suponer además que de los compuestos simples en el océano y la atmósfera primordiales surgieron con el tiempo, a concentraciones cada vez mayores, los aminoácidos más complicados, así como azúcares simples; aquellos aminoácidos se combinaron para formar péptidos; aquellas purinas, pirimidinas, azúcares y fosfato se combinaron para formar nucleótidos; y que, gradualmente, con el transcurso del tiempo, se crearon proteínas y ácidos nucleicos. Luego llegó el momento en que se alcanzó la fase decisiva: la formación, a través de una serie de combinaciones casuales, de una molécula de ácido nucleico capaz de inducir una replicación. Ese instante jalonó el comienzo de la vida.
Así, pues, un período de «evolución química» precedió a la evolución de la propia vida.
Al parecer, una simple molécula viva puede haber sido suficiente para iniciar la vida y dar origen a toda la amplia variedad de seres vivos, del mismo modo como una célula fertilizada puede dar origen a un organismo enormemente complejo. En la «sopa» orgánica que constituyó el océano en aquel entonces, las primeras

moléculas vivas pudieron haber dado lugar por replicación a miles de millones de moléculas similares a ellas mismas en un breve período de tiempo. Mutaciones ocasionales pudieron crear formas ligeramente modificadas de la molécula, y aquellas que de algún modo fueron más eficaces que las restantes debieron multiplicarse a expensas de sus vecinas y remplazar a las formas «antiguas». Si un grupo fue más eficiente en el agua caliente y otro en el agua fría, se debieron originar dos variedades, cada una limitada al ambiente al que se adaptaba mejor. De este modo, debió ponerse en movimiento la «evolución orgánica».

Aún cuando al principio existieron independientemente varias moléculas vivas, es muy probable que la más eficiente desplazara a las otras, de tal modo que muy bien pueda haber ocurrido que la vida actual proceda de una única molécula original. A pesar de la presencia y gran diversidad de seres vivos, todos ellos se ajustan al mismo plan básico. Sus células poseen un metabolismo muy similar. Además es altamente significativo que las proteínas de todos los seres vivos estén constituidas por L-aminoácidos, en vez de por D-aminoácidos. Es posible que la nucleoproteína original, a partir de la que deriva toda la vida, estuviera casualmente constituida por L-aminoácidos, y dado que los D no podían asociarse con los L para formar una cadena estable, lo que comenzó por casualidad persistió por replicación hasta alcanzar una absoluta universalidad. (Esto implica que los D-aminoácidos se hallan ausentes en la Naturaleza. Existen en las paredes celulares de las bacterias y en algunos compuestos antibióticos. Sin embargo, éstos son casos realmente excepcionales.) Desde luego, el paso desde una molécula viviente al tipo de vida que conocemos hoy, es todavía inmenso. Exceptuando los virus, toda la vida está estructurada con células, y una célula, por muy pequeña que pueda parecer a escala humana, es enormemente compleja tanto por su estructura como por sus relaciones recíprocas. ¿Cuál fue el principio de esto? Las investigaciones del bioquímico norteamericano Sidney W. Fox han arrojado bastante luz sobre el problema planteado por el origen de las células. A él le parecía que la Tierra primigenia debió haber estado muy caldeada y que la energía del calor pudo haber sido suficiente para formar compuestos complejos a partir de los más simples.

Deseando demostrarlo, Fox emprendió un experimento en 1958: calentó una mezcla de aminoácidos y observó que todos ellos formaban largas cadenas semejantes a las de las moléculas proteínicas. Las enzimas que engullían las proteínas ordinarias hicieron lo mismo con aquellos «proteinoides» y, por tanto, se los pudo utilizar como alimento de bacterias.

Lo más sorprendente fue esto: cuando Fox disolvió los proteinoides en agua caliente y dejó enfriar la solución, descubrió que todos ellos se agrupaban en diminutas «microsferas» cuyo tamaño era aproximadamente el de una bacteria pequeña. Aunque dichas microsferas no vivían, tal como se entiende usualmente este concepto, se comportaban igual que las células, al menos en ciertos aspectos (por ejemplo, las rodeaba una especie de membrana). Agregando determinados elementos químicos a la solución, Fox logró que las microsferas se hincharan y contrajeran tal como lo hacen las células ordinarias. Las microsferas echaron brotes que a veces parecieron crecer para romperse luego. También se separaron, se dividieron en dos, y se apiñaron formando cadenas.

Quizás en tiempos primarios esos minúsculos agregados de materias, sin vida propiamente dicha, constituyeran diversas variedades. Algunas serían especialmente ricas en ADN y excelentes para la réplica, aunque sólo tendrían una capacidad moderada para almacenar energía. Otros agregados manipularían bien la energía, pero darían réplicas tibias. A su debido tiempo, agrupaciones de tales agregados cooperarían entre sí, cada cual supliendo las deficiencias del otro hasta formar la célula moderna, un elemento mucho más eficiente que cualquiera de sus partes.

Esa célula moderna tendría ya núcleo —rico en ADN, pero incapaz de manejar por sí solo el oxígeno— y numerosos mitocondrios con una notable disposición para manipular el oxígeno aunque incapaces de reproducirse en ausencia del núcleo. (Los mitocondrios pueden haber sido otrora entidades independientes, como lo demuestra el hecho de que poseen

todavía pequeñas porciones de ADN.) Durante la existencia de las Atmósferas I y II, las formas primitivas de vida pudieron existir solamente a fuerza de desintegrar sustancias químicas complejas en otras más simples y almacenar la energía desarrollada. Las sustancias complejas se reconstruyeron gracias a los efectos de la radiación ultravioleta solar. Una vez se formó totalmente la Atmósfera II y la capa ozónica ocupó el lugar asignado, se presentó el peligro de la inanición, pues entonces dio fin el suministro de radiación ultravioleta.

Sin embargo, por aquella época se formaron algunos agregados similares a los mitocondrios que contenían clorofila, la antecesora del moderno cloroplasto. En 1966, los bioquímicos canadienses G. W. Hodson y B. L Baker empezaron a trabajar con pirrol y paraformaldehído (los cuales se pueden formar empleando sustancias todavía más simples, como las utilizadas en los experimentos del tipo Miller) y demostraron que se formaban anillos de porfidina —la estructura básica de la clorofila— tras un mero caldeamiento suave de tres horas.

El ineficaz empleo de la luz visible por los primitivos agregados clorofílicos debe de haber sido incluso preferible al procedimiento de sistemas no clorofílicos durante el período formativo de la capa ozónica. La luz visible podría atravesar fácilmente el ozono, y su deficiente energía (comparada con la ultravioleta) bastaría para activar el sistema clorofílico.

Los primeros organismos que consumieron clorofila no habrán sido probablemente más complicados que los cloroplastos individuales de nuestros días. En realidad, un grupo de organismos unicelulares y fotosintetizadores denominados «algas verdiazules» cuenta con dos mil especies (aunque no todos sean verdiazules, sí lo fueron los primeros sometidos a estudio). Éstos son células muy simples, más bien se diría bacterias por su estructura si no contuvieran clorofila. Las algas verdiazules pueden haber sido los descendientes más elementales del cloroplasto original; por otra parte, las bacterias lo habrán sido de los cloroplastos que perdieron su clorofila y tendieron al parasitismo o se nutrieron de los tejidos muertos y sus componentes.

Cuando los cloroplastos se multiplicaron en los antiguos mares, el anhídrido carbónico se consumió gradualmente y el oxígeno molecular ocupó su lugar. Entonces se formó nuestra atmósfera, la Atmósfera III. Las células vegetales ganaron progresivamente eficiencia, cada una llegó a contener numerosos cloroplastos. Al propio tiempo, las células elaboradas sin clorofila no podrían haber existido sobre la base precedente, pues las células vegetales arrebataron a los océanos todas sus reservas alimenticias y éstas ya no se formaron más excepto dentro de dichas células. No obstante, las células sin clorofila pero con un elaborado equipo mitocondrial capaz de manejar eficientemente células complejas y almacenar la energía producida por su disgregación, pudieron haber vivido ingiriendo las células vegetales y despojando las moléculas que estas últimas habían construido laboriosamente. Así se originó la célula animal del presente día. A su debido tiempo los organismos adquirieron suficiente complejidad para dejar los vestigios fósiles (vegetales y animales) que conocemos actualmente.

Entretanto, el medio ambiente terrestre ha cambiado de forma radical, desde el punto de vista de la creación de nueva vida. La vida ya no puede originarse y desarrollarse merced a un proceso de evolución puramente química. Por un simple hecho, las formas de energía que la hicieron surgir en un principio —la energía de las radiaciones ultravioleta y de la radiactividad— han cesado prácticamente.

Por otro lado, las formas de vida bien establecidas consumirían con gran rapidez cualquier molécula orgánica que se originara de forma espontánea. Por estas dos razones no existe virtualmente la posibilidad de un resurgimiento independiente de lo inanimado en lo animado (salvo por alguna futura intervención del ser humano, si llega alguna vez a descubrir el procedimiento). Hoy en día la generación espontánea es tan improbable, que puede ser considerada como básicamente imposible.

La Vida En Otros Mundos

Si se acepta el punto de vista de que la vida se originó simplemente como expresión de las leyes físicas y químicas, se deduce que con toda probabilidad la vida no se halla limitada al planeta Tierra. ¿Cuáles son, por tanto, las posibilidades de vida en el Universo? Comenzando por los lugares más próximos a casa podemos eliminar la Luna con absoluta tranquilidad porque allí falta el aire o el agua de modo perceptible. Se ha especulado con la posibilidad de que existan formas muy primitivas de vida en algunas grietas profundas donde tal vez sean concebibles las huellas de aire y agua. El astrónomo británico V. A. Firsoff ha alegado en su libro *Strange World of the Moon* que bajo la superficie lunar puede haber agua y que los gases absorbidos sobre la superficie cubierta de polvo pueden originar una «atmósfera» muy tenue que quizá sustentará una vida más o menos exótica. Urey adujo que el bombardeo meteórico de una Tierra primigenia pudo haber salpicado con agua la Luna, dándole temporalmente lagos y corrientes fluviales. Ciertamente las fotografías lunares del *Lunar Orbiter* han mostrado señales que parecen a todas luces cuencas de antiguos ríos.

Sin embargo, las rocas traídas desde la Luna por las sucesivas expediciones a nuestro satélite, iniciada en 1969, han mostrado una ausencia absoluta de agua y materia orgánica. Desde luego, son simples rocas de superficie y tal vez resultara distinto si se recogieran algunas subyacentes a varios metros bajo esa superficie. Pese a todo, las pruebas en nuestro poder parecen indicar que no hay vida de ninguna clase —ni la más elemental siquiera— en la Luna.

Venus parece un candidato mejor situado para la vida, aunque sólo sea por su masa (pues, en cuestión de tamaño, se asemeja mucho a la Tierra) y por el hecho irrefutable de que posee una atmósfera, e incluso más densa que la nuestra. En 1959, Venus eclipsó a la brillante estrella Regulus. Gracias a ello se pudo observar cómo atravesaba esa viva luz de Regulus la atmósfera venusiana, y adquirir así nuevos conocimientos referentes a su profundidad y densidad. El astrónomo norteamericano Donald Howard Menzel recogió suficientes datos para poder anunciar que el diámetro del cuerpo sólido de Venus medía 6.057,6 km, es decir, 112 menos que el más aproximado de los cálculos precedentes.

La atmósfera venusiana parece ser principalmente de anhídrido carbónico. Venus no tiene oxígeno libre perceptible, pero esa falta no representa una barrera infranqueable para la vida. Como ya expliqué anteriormente, la Tierra mantuvo vida probablemente durante infinidad de tiempo antes de poseer oxígeno libre en su atmósfera (aunque, a buen seguro, esa vida sería sumamente primitiva).

Hasta épocas bastante recientes no se descubrió vapor en el aire de Venus, y ello fue un fatal impedimento para la posibilidad de vida allí. A los astrónomos les incomodó sobremanera la imposibilidad de encontrar agua en Venus, pues esa circunstancia les impedía satisfactoriamente la presencia de una envoltura nubosa sobre el planeta. Entonces, en 1959, Charles B. Moore, del laboratorio de la «Arthur D. Little Company», ascendió en un aerostato a 24 km de altura, es decir hasta la estratosfera sobre casi toda la atmósfera terrestre interferente, y tomó fotografías de Venus con un telescopio. Su espectro mostró en la banda infrarroja que la atmósfera externa de Venus contenía tanto vapor de agua como la terrestre.

Sin embargo, las posibilidades de vida en Venus sufrieron otra caída de bruces, y esta vez aparentemente definitiva, por causa de su temperatura superficial. Radioondas procedentes de Venus indicaron que su temperatura de superficie podría superar largamente el punto de ebullición del agua. Sin embargo, quedó la esperanza de que esas radioondas indicadoras de temperaturas procedieran de la atmósfera externa venusiana y que, por consiguiente la superficie del planeta tuviera una temperatura más soportable.

No obstante, esa esperanza se esfumó en diciembre de 1962 cuando la sonda americana a Venus, el *Mariner II*, se acercó a la posición de Venus en el espacio y escudriñó su superficie buscando fuentes de radioondas. Los resultados de esos análisis

demostraron claramente que la superficie venusiana estaba demasiado caliente para conservar un océano. Las nubes retenían todas sus reservas de agua. La temperatura de Venus —que tal vez supere incluso los 500º C a juzgar por las temperaturas de superficie transmitidas desde una sonda soviética en diciembre de 1970— parece eliminar efectivamente toda posibilidad de vida, según la conocemos nosotros. También debemos eliminar a Mercurio, más próximo al Sol que Venus, más pequeño, caliente asimismo y carente de atmósfera.
Sin duda, Marte representa una posibilidad más prometedora. Tiene una atmósfera tenue de anhídrido carbónico y nitrógeno, y parece poseer suficiente agua para formar delgadas capas de hielo (su grosor es, probablemente, de unos 2,5 cm a lo sumo) que se crean y derriten con las estaciones. Las temperaturas marcianas son bajas pero no demasiado para la vida, y posiblemente no más inclementes que las de la Antártida. Incluso esa temperatura alcanza ocasionalmente unos 27º C muy reconfortantes en el ecuador marciano durante las horas más cálidas del día estival.
La posibilidad de vida en Marte ha intrigado al mundo entero durante casi un siglo. En 1877, el astrónomo italiano Giovanni Virginio Schiaparelli detectó unas líneas finas y rectas en la superficie del planeta. Él las denominó «canali». Esta palabra italiana significa «cauces», pero fue traducida erróneamente como canales, lo cual hizo deducir a la gente que aquellas líneas eran canales artificiales, construidos quizá para acarrear agua desde los ventisqueros a otros lugares necesitados de irrigación. El astrónomo norteamericano Percival Lowell abogó enérgicamente por esa interpretación de las marcas; los suplementos dominicales de los periódicos (así como las historias de ciencia ficción) armaron gran revuelo sobre la «evidencia» de vida inteligente en Marte.
Realmente se formularon serias dudas sobre la existencia misma de aquellas señales. Muchos astrónomos no las habían visto jamás pese a sus concienzudas tentativas; otros las habían visto sólo en brevísimos instantes. Había quienes creían en una ilusión óptica ocasionada por el afanoso deseo de ver algo intentando forzar los límites de la visión humana. Sea como fuere, ningún astrónomo cree que Marte pueda mantener formas avanzadas de vida.
Sin embargo, resta la posibilidad de que Marte mantenga formas simples de vida. Por ejemplo, sobre la superficie de Marte se ven grandes manchas que cambian con las estaciones, extendiéndose en el hemisferio donde es verano y contrayéndose en el hemisferio donde reina el invierno. ¿Podría ser esto un signo que indicara la existencia de vida vegetal en una forma simple? Ciertos experimentos de laboratorio han demostrado que algunos líquenes y microorganismos, aún estando adaptados al ambiente terrestre y no al marciano, pueden vivir y medrar bajo temperaturas y en una atmósfera que, según se cree, simulan las del medio ambiente marciano.
Tales esperanzas empezaron también a esfumarse como resultado de la prueba marciana realizada por el *Mariner IV*, lanzado el 28 de noviembre de 1964. Este artefacto pasó en 1965 a 9.654 km de Marte y envió fotografías de su superficie, estas no mostraron canal alguno; pero sí se evidenció por primera vez que la superficie marciana estaba sembrada profusamente de cráteres en forma parecida a la lunar. Se infirió de ello que la atmósfera de Marte no sólo era tenue y desecada hoy día sino que, probablemente, lo habría sido siempre.
Información adicional sobre la superficie marciana obtenida por otro «objeto volador» más alambicado todavía en 1969, sirvió solamente para empeorar aún más las cosas. Aquella atmósfera era incluso más tenue de lo que se había temido, y la temperatura más baja. La temperatura reinante en el polo sur marciano parecía no superar los –113º C, y las «cumbres nevadas» en las que se había confiado tanto para justificar la presencia de agua, estaban formadas probablemente por anhídrido carbónico sólido. Aunque no se puede hablar con certeza hasta tomar contacto con la superficie marciana, hoy parece muy probable que la vida, tal como la conocemos nosotros, no exista en Marte.
Respecto a los demás cuerpos planetarios más allá de Marte (o satélites o planetoides), parece ser que las condiciones son más rigurosas todavía. No obstante, Carl Sagan ha opinado que la

atmósfera de Júpiter debe producir un efecto de invernáculo tan potente que tal vez dé origen a temperaturas moderadas con las cuales pueda haber alguna especie de vida. Esto pareció menos prometedor cuando se averiguó que Júpiter radiaba tres veces más energía que la recibida desde el Sol, lo cual hizo pensar en otra fuente de energía (quizá contracción planetaria), cuya acción elevara las temperaturas hasta niveles superiores a los supuestos. Ahora bien, esto sigue siendo pura especulación, y a falta de una sonda planetaria en la vecindad de Júpiter, lo mejor es callarse. Cabe llegar, pues, a la conclusión de que en lo referente al Sistema Solar, la Tierra y únicamente la Tierra parece ser morada de la vida. Pero el Sistema Solar no está solo. ¿Cuáles son las posibilidades de vida en otros espacios del Universo? El número total de estrellas en el Universo conocido se calcula que es por lo menos de 1.000.000.000.000.000.000.000 (mil trillones). Nuestra propia galaxia contiene más de cien mil millones. Si todas las estrellas se han desarrollado por el mismo tiempo de proceso que aquel que se considera que ha creado nuestro propio Sistema Solar (es decir, la condensación de una gran nube de polvo y gas), entonces es muy probable que ninguna estrella exista de forma solitaria, sino que cada una sea parte de un sistema local que contenga más de un cuerpo celeste. Sabemos que existen muchas estrellas dobles, que giran en torno a un centro común, y se calcula que, al menos, de cada tres estrellas una pertenece a un sistema que contiene dos o más estrellas.

En nuestra opinión, lo que realmente precisamos encontrar es un sistema múltiple en el cual un número de miembros sea demasiado pequeño para generar luz propia y sean planetas más bien que estrellas. Si bien (por el momento) no disponemos de medios para detectar directamente cualquier planeta que se encuentra fuera de nuestro propio sistema solar, incluso en los sistemas estelares más cercanos, podemos no obstante obtener pruebas indirectas de su presencia. Esto se ha efectuado en el Observatorio Sproul del «Swarthmore College» bajo la dirección del Astrónomo holandés-americano Peter van de Kamp.

En 1943, pequeñas irregularidades de una de las integrantes del sistema de estrellas dobles, 61 del Cisne, mostraron que debía de existir un tercer componente, demasiado pequeño para generar luz. Este tercer componente, el 61 del Cisne C, debe de tener aproximadamente 8 veces la masa de Júpiter y por lo tanto (suponiendo la misma densidad), dos veces su diámetro. En 1960, un planeta de tamaño similar se localizó girando alrededor de la pequeña estrella Lalande 21185 (localizado, al menos, en el sentido de que su existencia era la forma más lógica de explicar las irregularidades en el movimiento de la estrella). En 1963, un detallado estudio de la estrella de Barnard indicó la presencia de un planeta, que sólo tenía una vez y media la masa de Júpiter.

La estrella de Bamard es la segunda más próxima a la nuestra, la Lalande 21185 es la tercera más próxima, y la 61 del Cisne la duodécima más cercana. Que existieran tres sistemas planetarios en íntima proximidad al nuestro sería extraordinariamente poco probable, a menos que dichos sistemas planetarios fueran muy comunes en general. Por supuesto, en las vastas distancias estelares, solo los planetas de mayores dimensiones podrían ser detectados y aún así con dificultad. Donde existen planetas superjovianos, parece muy razonable (e incluso inevitable) suponer que también deben de existir planetas más pequeños.

Pero, aún suponiendo que todas o la mayoría de las estrellas poseen sistemas planetarios, y que muchos de estos planetas son similares a la Tierra en tamaño, debemos saber qué criterios han de satisfacer tales planetas para poder ser habitables. Un científico del espacio, el norteamericano Stephen H. Dole, ha hecho un estudio particular de este problema en su libro *Habitable Planets for Man*, publicado en 1964, y ha llegado a ciertas conclusiones que, aunque especulativas, son razonables.

Señala, en primer lugar, que una estrella debe tener un cierto tamaño para poder poseer un planeta habitable. Cuanto más grande es la estrella, tanto menor es su vida, y, si excede de unas ciertas dimensiones, no vivirá lo suficiente como para permitir que un planeta recorra las prolongadas etapas de su evolución química, antes del desarrollo de formas de vida complejas. Una estrella

demasiado pequeña no puede calentar suficientemente a un planeta, a menos que éste se halle situado muy próximo a ella, con lo que sufriría periódicos efectos perjudiciales. Dole llega a la conclusión de que sólo las estrellas de las clases espectrales F2 a K1 son adecuadas para el mantenimiento de planetas con nivel de habitabilidad suficiente para la Humanidad; planetas que puedan ser colonizados (si el viaje entre las estrellas fuera algún día practicable) sin un esfuerzo excesivo. Existen, según los cálculos de Dole, 17 mil millones de tales estrellas en nuestra galaxia.
Una estrella con estas características podría poseer un planeta habitable o no poseer ninguno. Dole calcula la probabilidad de que una estrella de tamaño adecuado pueda tener un planeta de la masa conveniente y a la distancia correcta, con un apropiado período de rotación y una órbita adecuadamente regular, y, haciendo lo que le parece una razonable estimación, llega a la conclusión de que probablemente hay 600.000.000 de planetas habitables solamente en nuestra galaxia, conteniendo ya cada uno de ellos alguna forma de vida.
Si estos planetas habitables estuvieran más o menos homogéneamente distribuidos por la galaxia, Dole estima que debería existir un planeta habitable por cada 50.000 años-luz cúbicos. Esto significa que el planeta habitable más próximo a nosotros puede distar de la Tierra unos 27 años-luz, y que a unos 100 años-luz de distancia, deben encontrarse también un total de 50 planetas habitables.
Dole cita a continuación 14 estrellas distantes de nosotros a lo sumo 22 años-luz, que pueden poseer planetas habitables y sopesa las probabilidades de que esto pueda ser así en cada caso. Llega a la conclusión de que la mayor probabilidad de planetas habitables se da precisamente en las estrellas más cercanas a nosotros, las dos estrellas similares al Sol del sistema Alfa Centauro, la Alfa Centauro A y la Alfa Centauro B. Según estima Dole, estas dos estrellas compañeras tienen, consideradas en conjunto, una posibilidad entre diez de poseer planetas habitables. La probabilidad total para el conjunto de las 14 estrellas vecinas es de aproximadamente 2 entre 5.
Si consideramos la vida como la consecuencia de las reacciones químicas descritas en el apartado anterior, podemos ver que su desarrollo es inevitable en cualquier planeta similar a la Tierra.
Por supuesto, un planeta puede poseer vida y, no obstante, no poseer aún vida inteligente. No tenemos forma de hacer siquiera una conjetura razonable acerca de la probabilidad del desarrollo de la inteligencia sobre un planeta, y en este sentido, Dole, por ejemplo, tiene el buen acierto de no hacer ninguna. Después de todo, nuestra propia Tierra, el único planeta habitable que realmente conocemos y podemos estudiar, existió durante al menos dos mil millones de años con vida, ciertamente, pero sin vida inteligente.
Es posible que las marsopas y algunas otras especies emparentadas con ellas sean inteligentes, pero, por su condición de criaturas marinas, carecen de extremidades y no han podido desarrollar el uso del fuego; en consecuencia, su inteligencia, caso de que exista, no ha podido dirigirse en el sentido de una tecnología desarrollada. Es decir, si sólo consideramos la vida terrestre, entonces hace sólo aproximadamente un millón de años que la Tierra ha sido capaz de albergar una criatura viva con una inteligencia superior a la de un mono.
Además, esto significa que la Tierra ha poseído vida inteligente durante 1/2.000 (como burda aproximación) del tiempo en que ha tenido vida de algún tipo. Si podemos afirmar que, de todos los planetas que contienen vida, uno de cada 2.000 posee vida inteligente, esto representaría que, de los 640 millones de planetas habitables de los que habla Dole, en 320.000 podría darse vida inteligente. Puede muy bien ocurrir que no estemos en absoluto solos en el Universo.
Hasta muy recientemente, esta clase de posibilidad era considerada con seriedad únicamente en las novelas de ciencia ficción. Aquellos de mis lectores que saben que he escrito algunas novelas de este tipo hace algún tiempo, y que pueden tildar mis afirmaciones aquí como excesivamente entusiastas, les puedo asegurar que hoy en día muchos astrónomos aceptan como muy probable la existencia de vida inteligente en otros planetas.

En realidad, los científicos de los Estados Unidos aceptan esta posibilidad con la suficiente seriedad como para haber iniciado una investigación, bajo la dirección de Frank D. Drake, el llamado Proyecto Ozma (cuyo nombre deriva de uno de los libros para niños del Mago de Oz), que se propone registrar posibles señales de radio procedentes de otros mundos. La idea es intentar distinguir algún tipo de regularidad en las ondas de radio que proceden del espacio. Si detectan señales que siguen un cierto orden, distintas a aquellas al azar procedentes de estrellas emisoras de ondas de radio o de materia excitada en el espacio, podría suponerse que tales señales representan mensajes a partir de alguna inteligencia extraterrestre. Por supuesto, aunque tales mensajes fueran recibidos, la comunicación con dicha inteligencia distante constituiría un problema. Los mensajes pueden haber estado mucho tiempo en camino, y una respuesta también precisaría muchos años para alcanzar a la emisora distante, ya que el planeta potencialmente habitable más próximo se encuentra a una distancia de 4 1/3 años-luz.

Las regiones del firmamento mencionadas en un momento u otro en el curso del Proyecto Ozma incluían las direcciones en las que se encuentran Épsilon de Erídano, Tau de la Ballena. Ómicron-2 de Erídano. Epsilón de Indio, Alfa de Centauro, 70 de Ofiuco y 61 del Cisne. Sin embargo, después de dos meses de resultados negativos, el proyecto fue abandonado.

No obstante, la idea no ha muerto ni mucho menos. A causa de la vastedad del Universo, aún no podemos detectar la evidencia de vida e incluso es posible que nunca lleguemos a hacerlo. De todos modos, precisamente a causa de la vastedad del Universo, es forzoso que exista vida, hasta en forma inteligente, quizás en millones de variantes.

Y si nosotros no conseguimos dar con ellos, los extraterrestres nos encontrarán a nosotros.

XIII. LOS MICROORGANISMOS

Bacterias

Antes del siglo XVII, los seres vivientes más pequeños conocidos eran insectos diminutos. Naturalmente, se daba por sentado que no existía organismo alguno más pequeño. Poderes sobrenaturales podían hacer invisibles a los seres vivientes (todas las culturas así lo creían de una u otra forma), pero nadie pensaba, por un instante, que existieran criaturas de tamaño tan pequeño que no pudieran verse.

Si el hombre hubiera llegado siquiera a sospecharlo, acaso se iniciara mucho antes en el uso deliberado de instrumentos de aumento. Incluso los griegos y los romanos sabían ya que objetos de cristal de ciertas formas reflejaban la luz del sol en un punto dado, aumentando el tamaño de los objetos contemplados a través de ellos. Por ejemplo, así ocurría con una esfera de cristal hueca llena de agua. Ptolomeo trató sobre la óptica del espejo ustorio, y escritores árabes, tales como Alhakén, ampliaron sus observaciones en el año 1.000 de la Era Cristiana.

Robert Grosseteste, obispo inglés, filósofo y sagaz científico aficionado, fue el primero en sugerir, a principios del siglo XIII, el uso pacífico de dicho instrumento. Destacó el hecho de que las lentes —así llamadas por tener forma de lentejas— podían ser útiles para aumentar aquellos objetos demasiado pequeños para ver los de forma conveniente. Su discípulo, Roger Bacon, actuando de acuerdo con dicha sugerencia, concibió las gafas para mejorar la visión deficiente.

Al principio tan sólo se hicieron lentes convexos para corregir la vista cansada (hipermetropía). Hasta 1400 no se concibieron lentes cóncavos para corregir la vista corta o miopía. La invención de la imprenta trajo consigo una demanda creciente de gafas, y hacia el siglo XVI la artesanía de las gafas se había convertido en hábil profesión, llegando a adquirir especial calidad en los Países Bajos.

(Benjamín Franklin inventó, en 1760, los lentes bifocales, utilizables tanto para la hipermetropía como para la miopía. En 1827, el astrónomo británico, George Biddell Airy, concibió los primeros lentes para corregir el astigmatismo, que él mismo padecía. Y alrededor de 1888, un médico francés introdujo la idea de las lentes de contacto, que algún día convertirían en más o menos anticuadas las gafas corrientes.) Pero volvamos a los artesanos holandeses de gafas. Según se cuenta, en 1608, el aprendiz de uno de estos artesanos, llamado Hans Lippershey, se divertía durante uno de sus ratos de ocio contemplando los objetos a través de dos lentes, situados uno detrás de otro. Su asombro fue grande al descubrir que, manteniéndolos algo distanciados entre sí, los objetos lejanos parecían estar al alcance de la mano. El aprendiz apresuróse a comunicar su descubrimiento a su amo, y Lippershey procedió a construir el primer «telescopio» colocando ambos lentes en un tubo para mantener entre ellos la distancia adecuada. El príncipe Mauricio de Nassau, comandante en jefe de los ejércitos holandeses sublevados contra España, al percatarse del valor militar de aquel instrumento se esforzó por mantenerlo en secreto.

Sin embargo, no contaba con Galileo. Habiendo llegado hasta él rumores sobre cristales capaces de acortar las distancias, aunque enterado tan sólo de que ello se lograba con lentes, descubrió rápidamente el principio y construyó su propio telescopio; el de Galileo quedó terminado seis meses después del de Lippershey.

Galileo descubrió asimismo que reajustando las lentes de su telescopio podía aumentar el tamaño de los objetos que se encontraban cerca, por lo cual en realidad era un «microscopio».

Durante las décadas siguientes, varios científicos construyeron microscopios. Un naturalista italiano llamado Francesco Stelluti estudió con uno de ellos la anatomía de los insectos; Malpighi descubrió los capilares, y Hooke, las células en el corcho.

Pero la importancia del microscopio no se apreció en todo su valor hasta que Anton van Leeuwenhoek, mercader en la ciudad de Delft, se hiciera cargo de él (véase página 39). Algunas de las lentes de Van Leeuwenhoek aumentaban hasta doscientas veces el tamaño original.

Van Leeuwenhoek examinó todo tipo de objetos en forma absolutamente indiscriminada, describiendo cuanto veía con minucioso detalle en cartas dirigidas a la «Royal Society» de Londres. La democracia de la ciencia se apuntó un triunfo al ser designado el mercader miembro de la hidalga «Royal Society».

Antes de morir, el humilde artesano de microscopios de Delft recibió la visita de la reina de Inglaterra y de Pedro *el Grande*, zar de todas las rusias.

A través de sus lentes, Van Leeuwenhoek descubrió los espermatozoides, los hematíes y llegó hasta ver fluir la sangre por los tubos capilares en la cola de un renacuajo, y lo que aún es más importante, fue el primero en contemplar seres vivientes demasiado diminutos para ser observados a simple vista.

Descubrió aquellos «animálculos» en 1675, en el agua estancada. Analizó también las diminutas células del fermento y, llegando ya al límite del poder amplificador de sus lentes, logró finalmente, en 1676, divisar los «gérmenes» que hoy conocemos como bacterias.

El microscopio fue perfeccionándose con gran lentitud y hubo de transcurrir siglo y medio antes de poder estudiar con facilidad objetos del tamaño de los gérmenes.

Por ejemplo, hasta 1830 no pudo concebir el óptico inglés Joseph Jackson Lister un «microscopio acromático» capaz de eliminar los anillos de color que limitaban la claridad de la imagen. Lister descubrió que los glóbulos rojos (descubiertos por vez primera como gotas sin forma, por el médico holandés Jan Swammerdam, en 1658) eran discos bicóncavos, semejantes a diminutas rosquillas con hendiduras en lugar del orificio. El microscopio acromático constituyó un gran avance, y en 1878, un físico alemán, Ernst Abbe, inició una serie de perfeccionamientos que dieron como resultado lo que podríamos denominar el moderno microscopio óptico.

Los miembros del nuevo mundo de la vida microscópica fueron recibiendo gradualmente nombres. Los «animálculos» de Van Leeuwenhoek eran en realidad animales que se alimentaban de

pequeñas partículas y que se trasladaban mediante pequeños apéndices (flagelos), por finísimas pestañas o por flujo impulsor de protoplasma (seudópodos). A estos animales se les dio el nombre de «protozoos» (de la palabra griega que significa «animales primarios»), y el zoólogo alemán, Karl Theodor Ernst Siebold, los identificó como seres unicelulares.

Los «gérmenes» eran ya otra cosa; mucho más pequeños que los protozoos y más rudimentarios. Aún cuando algunos podían moverse, la mayor parte permanecían inactivos, limitándose a crecer y a multiplicarse. Con la sola excepción de su carencia de clorofila, no acusaban ninguna de las propiedades asociadas con los animales. Por dicha razón, se los clasificaba usualmente entre los hongos, plantas carentes de clorofila y que viven de materias orgánicas. Hoy día, la mayoría de los biólogos muestran tendencia a no considerarlos como planta ni animal, sino que los clasifican en un sector aparte, totalmente independiente. «Germen» es una denominación capaz de inducir a error. Igual término puede aplicarse a la parte viva de una semilla (por ejemplo el «germen de trigo»), a las células sexuales (germen embrionario), a los órganos embrionarios o, de hecho, a cualquier objeto pequeño que posea potencialidad de vida.

El microscopista danés Otto Frederik Müller consiguió, en 1773, distinguir lo suficientemente bien a aquellos pequeños seres para clasificarlos en dos tipos: «bacilos» (voz latina que significa «pequeños vástagos») y «espirilo» (por su forma en espiral). Con la aparición del microscopio acromático, el cirujano austríaco Theodor Billroth vio variedades aún más pequeñas a las que aplicó el término de «cocos» (del griego «baya»). Fue el botánico alemán, Ferdinand Julius Cohn, quien finalmente aplicó el nombre de «bacterias» (también voz latina que significa pequeño «vástago»).

Pasteur popularizó el término general «microbio» (vida diminuta), para todas aquellas formas de vida microscópica, vegetal, animal y bacterial. Pero pronto fue aplicado dicho vocablo a la bacteria, que por entonces empezaba a adquirir notoriedad. Hoy día, el término general para las formas microscópicas de vida es el de «microorganismo».

Pasteur fue el primero en establecer una conexión definitiva entre los microorganismos y la enfermedad, creando así la moderna ciencia de la «bacteriología» o, para utilizar un término más generalizado, de la «microbiología», y ello tuvo lugar por la preocupación de Pasteur con algo que más bien parecía tratarse de un problema industrial que médico. En la década de 1860, la industria francesa de la seda se estaba arruinando a causa de una epidemia entre los gusanos de seda. Pasteur, que ya salvara a los productores vitivinícolas de Francia, se encontró también enfrentado con aquel problema. Y de nuevo, haciendo inspirado uso del microscopio, como hiciera antes al estudiar los cristales asimétricos y las variedades de las células del fermento, Pasteur descubrió microorganismos que infectaban a los gusanos de seda y a las hojas de morera que les servían de alimento. Recomendó la destrucción de todos los gusanos y hojas infectadas y empezar de nuevo con los gusanos y hojas libres de infección. Se puso en práctica aquella drástica medida con excelentes resultados.

Con tales investigaciones, Pasteur logró algo más que dar nuevo impulso a la sericultura: generalizó sus conclusiones y enunció la «teoría de los gérmenes patógenos», que constituyó, sin duda alguna, uno de los descubrimientos más grandes que jamás se hicieran (y esto, no por un médico, sino por un químico, como estos últimos se complacen en subrayar).



[10]

Antes de Pasteur los médicos poco podían hacer por sus pacientes, a no ser recomendarles descanso, buena alimentación, aires puros y ambiente sano, tratando, ocasionalmente, algunos tipos de emergencias. Todo ello fue ya propugnado por el médico griego Hipócrates («el padre de la Medicina»), 400 años a. de J.C. Fue él quien introdujo el enfoque racional de la Medicina, rechazando las flechas de Apolo y la posesión demoníaca para proclamar que, incluso la epilepsia denominada por entonces la «enfermedad sagrada», no era resultado de sufrir la influencia de algún dios, sino simplemente un trastorno físico y como tal debía ser tratado. Las generaciones posteriores jamás llegaron a olvidar totalmente la lección.

No obstante, la Medicina avanzó con sorprendente lentitud durante los dos milenios siguientes. Los médicos podían incidir forúnculos, soldar huesos rotos y prescribir algunos remedios específicos que eran simplemente producto de la sabiduría del pueblo, tales como la quinina, extraída de la corteza del árbol chinchona (que los indios peruanos masticaban originalmente pata curarse la malaria) y la digital, de la planta llamada dedalera (un viejo remedio de los antiguos herbolarios para estimular el corazón). Aparte de esos escasos tratamientos y de la vacuna contra la viruela (de la que trataré más adelante), muchas de las medicinas y tratamientos administrados por los médicos después de Hipócrates tenderían más bien a incrementar el índice de mortalidad que a reducirlo.

En los dos primeros siglos y medio de la Era de la Ciencia, constituyó un interesante avance el invento, en 1819, del estetoscopio por el médico francés René-Théophile-Hyacinthe Laennec. En su forma original era poco más que un tubo de madera destinado a ayudar al médico a escuchar e interpretar los latidos del corazón, los perfeccionamientos introducidos desde entonces lo han convertido en un instrumento tan característico e indispensable para el médico como lo es la regla de cálculo para un ingeniero.

Por tanto, no es de extrañar que hasta el siglo XIX, incluso los países más civilizados se vieran azotados de forma periódica por plagas, algunas de las cuales ejercieron efecto trascendental en la Historia. La plaga que asolara Atenas, y en la que murió Pericles durante las guerras del Peloponeso, fue el primer paso hacia la ruina final de Grecia. La caída de Roma se inició, probablemente, con las plagas que barrieron el Imperio durante el reinado de Marco Aurelio. En el siglo XIV se calcula que la peste negra mató a una cuarta parte de la población de Europa; esta plaga y la pólvora contribuyeron, juntas, a destruir las estructuras sociales de la Edad Media.

Es evidente que las plagas no terminaron al descubrir Pasteur que las enfermedades infecciosas tenían su origen y difusión en los microorganismos. En la India, aún es endémico el cólera; y otros países insuficientemente desarrollados se encuentran intensamente sometidos a epidemias. Las enfermedades siguen constituyendo uno de los mayores peligros en épocas de guerra. De vez en cuando, se alzan nuevos organismos virulentos y se propagan por el mundo; desde luego, la gripe pandémica de 1918 mató alrededor de unos quince millones de personas, la cifra más alta de mortandad alcanzada por cualquier otra plaga en la historia de la Humanidad y casi el doble de los que murieron durante la Primera Guerra Mundial recién terminada.

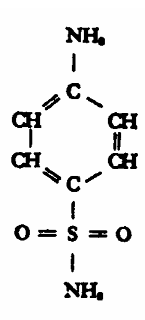
---

[10] Tipos de bacterias: coco, A); bacilos, B), y espirilos, C). Cada uno de estos tipos tiene una serie de variedades.

Sin embargo, el descubrimiento de Pasteur marcó un hito de trascendental importancia. El índice de mortalidad empezó a decrecer de forma sensible en Europa y los Estados Unidos, aumentando las esperanzas de supervivencia. Gracias al estudio científico de las enfermedades y de su tratamiento, que se iniciara con Pasteur, hombres y mujeres, en las regiones más avanzadas del mundo, pueden esperar ahora un promedio de vida de setenta años, en tanto que antes de Pasteur ese promedio era únicamente de cuarenta años en las condiciones más favorables y acaso tan sólo de veinticinco años cuando esas condiciones eran desfavorables. Desde la Segunda Guerra Mundial, las probabilidades de longevidad han ido ascendiendo de forma rápida incluso en las regiones menos adelantadas del mundo incluso antes de que, en 1865, Pasteur anticipara la teoría de los gérmenes, un médico vienés, llamado Ignaz Philipp Semmelweiss, realizó el primer ataque efectivo contra las bacterias, ignorando desde luego contra qué luchaba. Trabajaba en la sección de maternidad de uno de los hospitales de Viena donde el 12 % o más de las parturientas morían de algo llamado fiebres «puerperales» (en lenguaje vulgar, «fiebres del parto»). Semmelweiss observaba, inquieto, que de aquellas mujeres que daban a luz en su casa, con la sola ayuda de comadronas ignorantes, prácticamente ninguna contraía fiebres puerperales. Sus sospechas se acrecentaron con la muerte de un médico en el hospital, a raíz de haberse inferido un corte mientras procedía a la disección de un cadáver. ¿Acaso los médicos y estudiantes procedentes de las secciones de disección transmitían de alguna forma la enfermedad a las mujeres que atendían y ayudaban a dar a luz? Semmelweiss insistió en que los médicos se lavaran las manos con una solución de cloruro de cal. Al cabo de un año, el índice de mortalidad en las secciones de maternidad había descendido de1 12 al 1 %.
Pero los médicos veteranos estaban furiosos. Resentidos por la sugerencia de que se habían portado como asesinos y humillados por todos aquellos lavados de manos, lograron expulsar a Sernmelweiss del hospital. (A ello contribuyó la circunstancia de que este último fuese húngaro y el hecho de haberse sublevado Hungría contra los gobernantes austríacos.) Semmelweiss se fue a Budapest, donde consiguió reducir el índice de mortalidad materna, en tanto que en Viena volvía a incrementarse durante una década aproximadamente. Pero el propio Semmelweiss murió de fiebres puerperales en 1865, a causa de una infección accidental, a los cuarenta y siete años de edad, precisamente poco antes de que le fuera posible contemplar la reivindicación científica de sus sospechas con respecto a la transmisión de enfermedades. Fue el mismo año en que Pasteur descubriera microorganismos en los gusanos de seda enfermos y en que un cirujano inglés, llamado Joseph Lister (hijo del inventor del microscopio acromático), iniciara, de forma independiente, el ataque químico contra los gérmenes.
Lister recurrió a la sustancia eficaz del fenol (ácido carbólico). Lo utilizó por primera vez en las curas a un paciente con fractura abierta. Hasta aquel momento, cualquier herida grave casi invariablemente se infectaba. Como es natural, el fenol de Lister destruyó los tejidos alrededor de la herida, pero, al propio tiempo, aniquiló las bacterias. El paciente se recuperó de forma notable y sin complicación alguna.
A raíz de este éxito, Lister inició la práctica de rociar la sala de operaciones con fenol. Acaso resultara duro para quienes tenían que respirarlo, pero empezó a salvar vidas. Como en el caso de Semmelweiss, hubo oposición, pero los experimentos de Pasteur habían abonado el terreno para la antisepsia y Lister se salió fácilmente con la suya.
El propio Pasteur tropezaba con dificultades en Francia (a diferencia de Lister, carecía de la etiqueta unionista de Doctor en Medicina), pero logró que los cirujanos hirvieran sus instrumentos y desinfectaran los vendajes. La esterilización con vapor, «a lo Pasteur», sustituyó a la desagradable rociada con fenol de Lister. Se investigaron y se encontraron antisépticos más suaves capaces de matar las bacterias, sin perjudicar innecesariamente los tejidos. El médico francés Casimir-Joseph Davaine informó, en 1873, sobre las propiedades antisépticas del yodo y de la «tintura de yodo» (o sea, yodo disuelto en una combinación de alcohol y

agua), que hoy día es de uso habitual en los hogares, este y otros productos similares se aplican automáticamente a todos los rasguños. No admite dudas el elevadísimo número de infecciones evitadas de esta forma.
De hecho, la investigación para la protección contra las infecciones iba orientándose cada vez más a prevenir la entrada de los gérmenes («asepsia») que a destruirlos una vez introducidos, como se hacía con la antisepsia. En 1890, el cirujano americano William Stewart Halstead introdujo la práctica de utilizar guantes de goma esterilizados durante las operaciones; para 1900, el médico británico William Hunter había incorporado la máscara de gasa para proteger al paciente contra los gérmenes contenidos en el aliento del médico.
Entretanto, el médico alemán Robert Koch había comenzado a identificar las bacterias específicas responsables de diversas enfermedades. Para lograrlo, introdujo una mejora vital en la naturaleza del tipo de cultivo (esto es, en la clase de alimentos en los que crecían las bacterias). Mientras Pasteur utilizaba cultivos líquidos, Koch introdujo el elemento sólido. Distribuía muestras aisladas de gelatina (que más adelante fue sustituida por el agar-agar, sustancia gelatinosa extraída de las algas marinas). Si se depositaba con una aguja fina tan sólo una bacteria en un punto de esa materia, se desarrollaba una auténtica colonia alrededor del mismo, ya que sobre la superficie sólida del agar-agar, las bacterias se encontraban imposibilitadas de moverse o alejarse de su progenitora, como lo hubieran hecho en el elemento líquido. Un ayudante de Koch, Julius Richard Petri, introdujo el uso de cápsulas cóncavas con tapa a fin de proteger los cultivos de la contaminación por gérmenes bacteriológicos flotantes en la atmósfera; desde entonces han seguido utilizándose a tal fin las «cápsulas de Petri».
De esa forma, las bacterias individuales darían origen a colonias que entonces podrían ser cultivadas de forma aislada y utilizadas en ensayos para observar las enfermedades que producirían sobre animales de laboratorio. Esa técnica no sólo permitió la identificación de una de terminada infección, sino que también posibilitó la realización de experimentos con los diversos tratamientos posibles para aniquilar bacterias específicas.
Con sus nuevas técnicas, Koch consiguió aislar un bacilo causante del ántrax y, en 1882, otro que producía la tuberculosis. En 1884, aisló también la bacteria que causaba el cólera. Otros siguieron el camino de Koch, Por ejemplo, en 1883, el patólogo alemán Edwin Klebs aisló la bacteria causante de la difteria. En 1905, Koch recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología.
Una vez identificadas las bacterias, el próximo paso lo constituía el descubrimiento de las medicinas capaces de aniquilarlas sin matar al propio tiempo al paciente. A dicha investigación consagró sus esfuerzos el médico y bacteriólogo alemán, Paul Ehrlich, que trabajara con Koch. Consideró la tarea como la búsqueda de una «bala mágica», que no dañaría el cuerpo aniquilando tan sólo las bacterias.
Ehrlich mostró su interés por tinturas que colorearan las bacterias. Esto guardaba estrecha relación con la investigación de las células. La célula, en su estado natural, es incolora y transparente, de manera que resulta en extremo difícil observar con detalle su interior. Los primeros microscopistas trataron de utilizar colorantes que tiñeran las células, pero dicha técnica sólo pudo ponerse en práctica con el descubrimiento, por parte de Perkin, de los tintes de anilinas (véase capítulo X). Aunque Ehrlich no fue el primero que utilizara los tintes sintéticos para colorear, en los últimos años de la década de 1870 desarrolló la técnica con todo detalle, abriendo así paso al estudio de Flemming sobre mitosis y al de Feulgen del ADN en los cromosomas (véase capítulo XII).
Pero Ehrlich tenía también otras bazas en reserva. Consideró aquellos tintes como posibles bactericidas. Era factible que una mancha que reaccionara con las bacterias más intensamente que con otras células, llegara a matar las bacterias, incluso al ser inyectada en la sangre en concentración lo suficientemente baja como para no dañar las células del paciente. Para 1907, Ehrlich había descubierto un colorante denominado «rojo tripán», que serviría para teñir tos tripanosomas, organismos responsables de la temida enfermedad africana del sueño, transmitida a través de la

mosca tsetsé. Al ser inyectado en la sangre a dosis adecuadas, el rojo tripán aniquilaba los tripanosomas sin matar al paciente.
Pero Ehrlich no estaba satisfecho; quería algo que aniquilara de forma más radical los microorganismos. Suponiendo que la parte tóxica de la molécula del rojo tripán estaba constituida por la combinación «azo», o sea, un par de átomos de nitrógeno (—N = N—), hizo suposiciones sobre lo que podría lograrse con una combinación similar de átomos de arsénico (—As = As—). El arsénico es químicamente similar al nitrógeno, pero mucho más tóxico. Ehrlich empezó a ensayar compuestos de arsénico, uno tras otro, en forma casi indiscriminada, numerándolos metódicamente a medida que lo hacía. En 1909, un estudiante japonés de Ehrlich, Sahachiro Hata, ensayó el compuesto 606, que fracasara contra los tripanosomas, en la bacteria causante de la sífilis. Demostró ser letal para dicho microbio (denominado «espiroqueta» por su forma en espiral).
Ehrlich se dio cuenta inmediatamente de que había tropezado con algo mucho más importante que una cura para la tripanosomiasis, ya que, al fin y al cabo, se trataba de una enfermedad limitada, confinada a los trópicos. Hacía ya más de cuatrocientos años que la sífilis constituía un azote secreto en Europa, desde tiempos de Cristóbal Colón. (Se dice que sus hombres la contrajeron en el Caribe; en compensación, Europa obsequió con la viruela a los indios.) No sólo no existía curación para la sífilis, sino que una actitud gazmoña había cubierto la enfermedad con un manto de silencio, permitiendo así que se propagara sin restricciones.
Ehrlich consagró el resto de su vida (murió en 1915) a tratar de combatir la sífilis con el compuesto 606 o «Salvarsán» como él lo llamara («arsénico inocuo»). La denominación química es la de arsfenamina. Podía curar la enfermedad, pero su uso no carecía de riesgos, y Ehrlich hubo de imponerse a los hospitales para que lo utilizaran en forma adecuada.
Con Ehrlich se inició una nueva fase de la quimioterapia. Finalmente, en el siglo xx, la Farmacología —el estudio de la acción de productos químicos independientes de los alimentos, es decir, los «medicamentos»—, adquirió carta de naturaleza como auxiliar de la medicina. La arsfenamina fue la primera medicina sintética, frente a los remedios vegetales, como la quinina o los minerales de Paracelso y de quienes le imitaban.
Como era de esperar, al punto se concibieron esperanzas de que podrían combatirse todas las enfermedades con algún pequeño antídoto, bien preparado y etiquetado. Pero durante la cuarta parte de siglo que siguiera al descubrimiento de Ehrlich, la suerte no acompañó a los creadores de nuevas medicinas. Tan sólo logró éxito la síntesis, por químicos alemanes, de la «plasmoquina», en 1921, y la «atebrina», en 1930; podían utilizarse como sustitutivos de la quinina contra la malaria (prestaron enormes servicios a los ejércitos aliados en las zonas selváticas, durante la Segunda Guerra Mundial, con ocasión de la ocupación de Java por los japoneses, ya que ésta constituía la fuente del suministro mundial de quinina que, al igual que el caucho, se había trasladado de Sudamérica al Sudeste asiático).
En 1932, al fin se obtuvo algún éxito. Un químico alemán, llamado Gerhard Domagk había estado inyectando diversas tinturas en ratones infectados. Ensayó un nuevo colorante rojo llamado «Prontosil» en ratones infectados con el letal estreptococo hemolítico, ¡el ratón sobrevivió! Se lo aplicó a su propia hija, que se estaba muriendo a causa de una gravísima estreptococia hemolítica. Y también sobrevivió. Al cabo de tres años, el «Prontosil» había adquirido renombre mundial como medicina capaz de detener en el hombre la estreptococia.
Pero, cosa extraña, el «Prontosil» no aniquilaba los estreptococos en el tubo de ensayo, sino tan sólo en el organismo. En el Instituto Pasteur de París, J. Trefouel y sus colaboradores llegaron a la conclusión de que el organismo debía transformar el «Prontosil» en alguna otra sustancia capaz de ejercer efecto sobre las bacterias. Procedieron a aislar del «Prontosil» el eficaz componente denominado «sulfanilamida». En 1908 se había sintetizado dicho compuesto y, considerándosele inútil, fue relegado al olvido. La estructura de la sulfanilamida es:



Fue la primera de las «medicinas milagrosas». Ante ella fueron cayendo las bacterias, una tras otra. Los químicos descubrieron que, mediante la sustitución de varios grupos por uno de los átomos hidrógeno en el grupo que contenía azufre, podían obtener una serie de compuestos, cada uno de los cuales presentaba propiedades antibactericidas ligeramente diferentes. En 1937, se introdujo la «sulfapiridina»; en 1939, el «sulfatiazol», y en 1941, la «sulfadiacina». Los médicos tenían ya para elegir toda una serie de sulfamidas para combatir distintas infecciones. En los países más adelantados en Medicina descendieron de forma sensacional los índices de mortalidad a causa de enfermedades bacteriológicas, en especial la neumonía neumocócica.

En 1939, Domagk recibió el premio Nobel de Medicina y fisiología. Al escribir la carta habitual de aceptación, fue rápidamente detenido por la Gestapo; el gobierno nazi, por razones propias peculiares, se mostraba opuesto a toda relación con los premios Nobel. Domagk consideró lo más prudente rechazar el premio. Una vez terminada la Segunda Guerra Mundial, libre ya de aceptar el premio, Domagk se trasladó a Estocolmo para recibirlo en forma oficial.

Los medicamentos a base de sulfamidas gozaron tan sólo de un breve período de gloria, ya que pronto quedaron relegados al olvido por el descubrimiento de un arma antibacteriológica de mucha mayor potencia, los antibióticos.

Toda materia viva (incluido el hombre), acaba siempre por retornar a la tierra para convertirse en podredumbre y descomponerse. Con la materia muerta y los despojos de los seres vivos van los gérmenes de las muchas enfermedades que infectan a esas criaturas. Entonces, ¿por qué la tierra se encuentra, por lo general, tan notablemente limpia de todo germen infeccioso? Muy pocos de ellos (el bacilo del ántrax es uno de esos raros gérmenes) sobreviven en el suelo. Hace unos años, los bacteriólogos empezaron a sospechar que la tierra contenía microorganismos o sustancias capaces de destruir las bacterias.

Ya en 1877, por ejemplo, Pasteur había advertido que algunas bacterias morían en presencia de otras y, si esto es así, el suelo ofrece una gran variedad de organismos en los que investigar la muerte de otros de su clase. Se estima que cada hectárea de terreno contiene alrededor de 900 kg de mohos, 450 kg de bacterias, 90 kg de protozoos, 45 kg de algas y 45 kg de levadura.

René Jules Dubos, del Instituto Rockefeller, fue uno de los que llevó a cabo una deliberada investigación de tales bactericidas. En 1939, aisló de un microorganismo del suelo, el *Bacillus brevis*, una sustancia llamada «tirotricina», de la que a su vez aisló dos compuestos destructores de bacterias a los que denominó «gramicidina» y «tirocidina». Resultaron ser péptidos que contenían D-aminoácidos, el auténtico modelo representativo de los L-aminoácidos ordinarios contenidos en la mayor parte de las proteínas naturales.

La gramidicina y la tirocidina fueron los primeros antibióticos producidos como tales. Pero doce años antes se había descubierto un antibiótico que demostraría ser inconmensurablemente más importante... aún cuando se habían limitado a hacerlo constar en un documento científico.

El bacteriólogo británico Alexander Fleming se encontró una mañana con que algunos cultivos de estafilococos (la materia común que forma el pus) que dejara sobre un banco estaban contaminados por algo que había destruido las bacterias. En los platillos de cultivos aparecían claramente unos círculos en el punto donde quedaran destruidos los estafilococos. Fleming, que mostraba interés por la antisepsia (había descubierto que una enzima de las lágrimas llamada «lisosoma» poseía propiedades

antisépticas), trató al punto de averiguar lo que había matado a la bacteria, descubriendo que se trataba de un moho común en el pan, *Penicillum notatun.* Alguna sustancia producida por dicho moho resultaba letal para los gérmenes. Como era usual, Fleming publicó sus resultados en 1929, pero en aquella época nadie le prestó demasiada atención.
Diez años después, el bioquímico británico Howard Walter Florey y su colaborador de origen alemán, Ernst Boris Chain, se mostraron intrigados ante aquel descubrimiento ya casi olvidado y se consagraron a aislar la sustancia antibactericida. Para 1941 habían obtenido un extracto que se demostró clínicamente efectivo contra cierto número de bacterias «grampositivas» (bacteria que retiene una tintura, desarrollada en 1884 por el bacteriólogo danés Hans Christian Joachim Gram).
A causa de la guerra, Gran Bretaña no se encontraba en situación de producir el medicamento, por lo que Florey se trasladó a los Estados Unidos y colaboró en la realización de un programa para desarrollar métodos de purificación de la penicilina y apresurar su producción con tierra vegetal. Al término de la guerra se encontraba ya en buen camino la producción y uso a gran escala de la penicilina. Ésta no sólo llegó a suplantar casi totalmente a las sulfamidas, sino que se convirtió —y aún sigue siéndolo— en uno de los medicamentos más importantes en la práctica de la Medicina. Es en extremo efectiva contra gran número de infecciones, incluidas la neumonía, la gonorrea, la sífilis, la fiebre puerperal, la escarlatina y la meningitis. (A la escala de efectividad se la llama «espectro antibiótico».) Además, está prácticamente exenta de toxicidad o de efectos secundarios indeseables, excepto en aquellos individuos alérgicos a la penicilina.
En 1945, Fleming, Florey y Chain recibieron, conjuntamente, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.
Con la penicilina se inició una elaborada búsqueda, casi increíble, de otros antibióticos. (El vocablo fue ideado por el bacteriólogo Selman A. Waksman, de la Rutgers University.)
En 1943, Waksman aisló de un moho del suelo, del género *Streptomyces*, el antibiótico conocido como «estreptomicina». Ésta atacaba las bacterias «gramnegativas» (aquellas que perdían con facilidad el colorante de Gram).
Su mayor triunfo lo consiguió contra el bacilo de la tuberculosis. Pero la estreptomicina, a diferencia de la penicilina, es tóxica y debe usarse con gran cautela.
Waksman recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1952, por su descubrimiento de la estreptomicina.
En 1947, se aisló otro antibiótico, el cloranfenicol, del género *Streptomyces.* Ataca no sólo a ciertos organismos más pequeños, en especial a los causantes de la fiebre tifoidea y la psitacosis (fiebre del loro). Pero, a causa de su toxicidad, es necesario un cuidado extremado en su empleo.
Luego llegaron toda una serie de antibióticos de «amplio espectro», encontrados al cabo de minuciosos exámenes de muchos millares de muestras de tierra, aureomicina, terramicina, acromicina, y así sucesivamente. El primero de ellos, la aureomicina, fue aislado por Benjamin Minge Duggar y sus colaboradores, en 1944, apareciendo en el mercado en 1948. Estos antibióticos se denominan «tetraciclinas», porque en todos los casos su molécula está compuesta por cuatro anillos, uno al lado de otro. Son efectivos contra una amplia gama de microorganismos y especialmente valiosos porque su toxicidad es relativamente baja. Uno de sus efectos secundarios más molestos se debe a la circunstancia de que, al romper el equilibrio de la flora intestinal, entorpecen el curso natural de la acción intestinal y a veces producen diarrea.
Después de la penicilina (que resulta mucho menos onerosa), las tetraciclinas constituyen en la actualidad los medicamentos más recetados y comunes en caso de infección. Gracias a todos los antibióticos en general, los índices de mortalidad en muchos casos de enfermedades infecciosas han descendido a niveles satisfactoriamente bajos.
(Desde luego, los seres humanos que se conservan vivos por el incesante dominio del hombre sobre las enfermedades infecciosas,

corren un peligro mucho mayor de sucumbir a trastornos del metabolismo. Así, durante los últimos ocho años, la incidencia de diabetes, la dolencia más común de ese género, se ha decuplicado.) No obstante, el mayor contratiempo en el desarrollo de la quimioterapia ha sido el acelerado aumento en la resistencia de las bacterias. Por ejemplo, en 1939, todos los casos de meningitis y de neumonía neumocócica reaccionaron favorablemente a la administración de sulfamidas.

Veinte años después, tan sólo en la mitad de los casos tuvieron éxito. Los diversos antibióticos también empezaron a perder efectividad con el transcurso del tiempo.

No es que la bacteria «aprenda» a resistir, sino que entre ellas se reproducen mutantes resistentes, que se multiplican al ser destruidas las cadenas «normales». El peligro es aún mayor en los hospitales donde se utilizan de forma constante antibióticos y donde los pacientes tienen, naturalmente, una resistencia a la infección por debajo de la normal. Algunas nuevas cadenas de estafilococos ofrecen una resistencia especialmente tenaz a los antibióticos. El «estafilococo hospitalario» es hoy día motivo de seria preocupación, por ejemplo, en las secciones de maternidad, y en 1961 se le dedicaron grandes titulares cuando una neumonía, favorecida por ese tipo de bacterias resistentes, estuvo a punto de causar la muerte a la estrella de cine Elizabeth Taylor.

Afortunadamente, cuando un antibiótico fracasa, acaso otro pueda todavía atacar a las bacterias resistentes. Nuevos antibióticos y modificaciones sintéticas de los antiguos, tal vez puedan ofrecer remedio contra las mutaciones. Lo ideal sería encontrar un antibiótico al que ningún mutante fuera inmune. De esa forma no quedarían supervivientes determinadas bacterias, las cuales, por tanto, no podrían multiplicarse. Se ha obtenido cierto número de esos candidatos. Por ejemplo, en 1960 se desarrolló una penicilina modificada, conocida como «estaficilina». En parte es sintética y, debido a que su estructura es extraña a la bacteria, su molécula no se divide ni su actividad queda anulada por enzimas, como la «penicilinasa» (que Chain fuera el primero en descubrir). En consecuencia, la estaficilina destruye las cadenas resistentes; por ejemplo, se utilizó para salvar la vida de la artista Elizabeth Taylor.

Pero aún así también han aparecido cadenas de estafilococos resistentes a las penicilinas sintéticas. Es de suponer que ese círculo vicioso se mantendrá eternamente.

Nuevos aliados contra las bacterias resistentes los constituyen algunos otros nuevos antibióticos y versiones modificadas de los antiguos. Sólo cabe esperar que el enorme progreso de la ciencia química logre mantener el control sobre la tenaz versatilidad de los gérmenes patógenos.

El mismo problema del desarrollo de cadenas resistentes surge en la lucha del hombre contra otros enemigos más grandes, los insectos, que no sólo le hacen una peligrosa competencia en lo que se refiere a los alimentos, sino que también propagan las enfermedades. Las modernas defensas químicas contra los insectos surgieron en 1939, con el desarrollo por un químico suizo, Paul Müller, del producto químico «dicloro-difenil-tricloroetano», comúnmente conocido por las iniciales «DDT». Por su descubrimiento, se le concedió a Müller el premio Nobel de Medicina y Fisiología, en 1948.

Por entonces, se utilizaba ya el DDT a gran escala, habiéndose desarrollado tipos resistentes de moscas comunes. Por tanto, es necesario desarrollar continuamente nuevos «insecticidas», o «pesticidas» para usar un término más general que abarque los productos químicos utilizados contra las ratas y la cizaña. Han surgido críticas respecto a la superquímica en la batalla del hombre contra otras formas de vida. Hay quienes se sienten preocupados ante la posible perspectiva de que una parte cada vez mayor de la población conserve la vida tan sólo gracias a la química; temen que si, llegado un momento, fallara la organización tecnológica del hombre, aún cuando sólo fuera temporalmente, tendría lugar una gran mortandad al caer la población víctima de las infecciones y enfermedades contra las cuales carecerían de la adecuada resistencia natural.

En cuanto a los pesticidas, la escritora científica americana, Rachel Louise Carson, publicó un libro, en 1962, *Silent Spring*

(Primavera silenciosa), en el que dramáticamente llama la atención sobre la posibilidad de que, por el uso indiscriminado de los productos químicos, la Humanidad pueda matar especies indefensas e incluso útiles, al mismo tiempo que aquellas a las que en realidad trata de aniquilar. Además, Rachel Carson sostenía la teoría de que la destrucción de seres vivientes, sin la debida consideración, podría conducir a un serio desequilibrio del intrincado sistema según el cual unas especies dependen de otras y que, en definitiva, perjudicaría al hombre en lugar de ayudarle. El estudio de ese encadenamiento entre las especies se denomina «ecología», y no existe duda alguna de que la obra de Rachel Carson anima a un nuevo y minucioso examen de esa rama de la Biología.

Desde luego, la respuesta no debe implicar el abandono de la tecnología ni una renuncia total a toda tentativa para dominar los insectos (pues se pagaría un precio demasiado alto en forma de enfermedades e inanición), sino idear métodos más específicos y menos dañinos para la estructura ecológica en general. Los insectos tienen también sus enemigos. Estos enemigos, bien sean parásitos de insectos o insectívoros, deben recibir el apropiado estímulo. Se pueden emplear también sonidos y olores para repeler a los insectos y hacerles correr hacia su muerte.

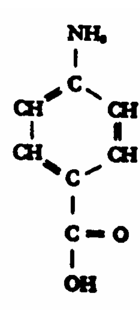
También se les puede esterilizar mediante la radiación. Sea como fuere, debe dedicarse el máximo esfuerzo para establecer un punto de partida en la lucha contra los insectos.

Una prometedora línea de ataque, organizada por el biólogo americano Carrol Milton Williams, consiste en utilizar las propias hormonas de los insectos. El insecto tiene una metamorfosis periódica y pasa por dos o tres fases bien definidas: larva, crisálida y adulto. Las transiciones son complejas y tienen lugar bajo el control de las hormonas. Así, una de ellas, llamada «hormona juvenil», impide el paso a la fase adulta hasta el momento apropiado.

Mediante el aislamiento y aplicación de la hormona juvenil, se puede interceptar la fase adulta durante el tiempo necesario para matar al insecto. Cada insecto tiene su propia hormona juvenil y sólo ella le hace reaccionar. Así pues, se podría emplear una hormona juvenil específica para atacar a una determinada especie de insecto sin perjudicar a ningún otro organismo del mundo. Guiándose por la estructura de esa hormona, los biólogos podrían incluso preparar sustitutivos sintéticos que serían mucho más baratos y actuarían con idéntica eficacia.

En suma, la respuesta al hecho de que el progreso científico puede tener algunas veces repercusiones perjudiciales, no debe implicar el abandono del avance científico, sino su sustitución por un avance aún mayor aplicado con prudencia e inteligencia.

En cuanto al trabajo de los agentes quimioterapéuticos, cabe suponer que cada medicamento inhibe, en competencia, alguna enzima clave del microorganismo. Esto resulta más evidente en el caso de las sulfamidas. Son muy semejantes al «ácido paraminobenzoico» (generalmente escrito ácido p-aminobenzoico), que tiene la estructura:



El ácido p-aminobenzoico es necesario para la síntesis del «ácido fólico», sustancia clave en el metabolismo de las bacterias, así como en otras células. Una bacteria que asimile una molécula de sulfanilamida en lugar de ácido p-aminobenzoico ya es incapaz de producir ácido fólico, porque la enzima que se necesita para el proceso ha sido puesta fuera de combate. En consecuencia, la bacteria cesa de crecer y multiplicarse. Las células del paciente humano permanecen, por otra parte, inalterables, obtienen el ácido fólico de los alimentos y no tienen que sintetizarlo. De esta forma

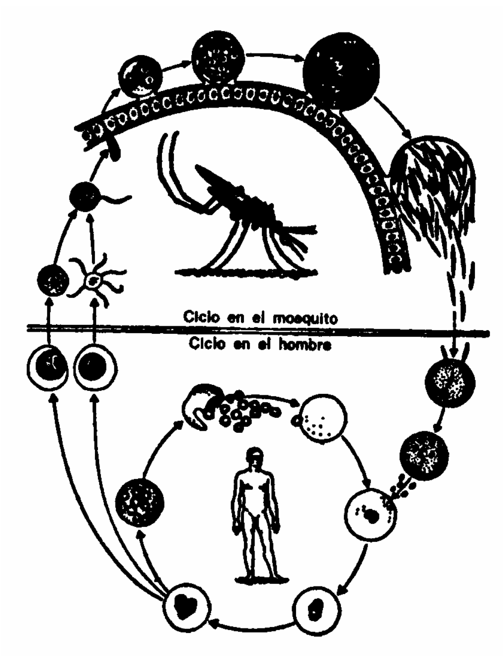
en las células humanas no existen enzimas que se inhiban con concentraciones moderadas de sulfamidas.
Incluso cuando una bacteria y la célula humana posean sistemas similares existen otras formas de atacar, relativamente, la bacteria. La enzima bacteriológica puede mostrarse más sensible a determinado medicamento, que la enzima humana de tal manera que una dosis determinada puede aniquilar a la bacteria sin dañar gravemente las células humanas. O también un medicamento de cualidades específicas puede penetrar la membrana de la bacteria, pero no la de la célula humana.
¿Actúan también los antibióticos mediante inhibición competitiva de enzimas? En este caso, la respuesta es menos clara. Pero existe buena base para creer que, al menos con algunos de ellos, ocurre así.
Como ya se ha mencionado anteriormente, la gramicidina y la tirocidina contienen el D-aminoácido «artificial». Acaso se interpongan a las enzimas que forman compuestos de los L-aminoácidos naturales. Otro antibiótico péptido, la bacitracina, contiene ornitina; por ello, quizás inhiba a las enzimas a utilizar arginina, a la que se asemeja la ornitina. La situación es similar con la estreptomicina; sus moléculas contienen una extraña variedad de azúcar capaz de interferir con alguna enzima que actúe sobre uno de los azúcares normales de las células vivas. Asimismo, el cloranfenicol se asemeja al aminoácido fenilalanina; igualmente, parte de la molécula penicilina se parece al aminoácido cisteína. En ambos casos existe gran probabilidad de inhibición competitiva.
La evidencia más clara de acción competitiva por un antibiótico que hasta ahora se baya presentado, nos la ofrece la «piromicina», sustancia producida por un moho *Streptomyces.* Este compuesto presenta una estructura muy semejante a la de los nucleótidos (unidades constructoras de los ácidos nucleicos); Michael Yarmolinsky y sus colaboradores de la «Johns Hopkins University» han demostrado que la puromicina, en competencia con el ARN-transfer, interfiere en la síntesis de proteínas. Por su parte, la estreptomicina interfiere con el ARN-transfer, forzando la mala interpretación del código genético y la formación de proteínas inútiles. Por desgracia, ese tipo de interferencia la hace tóxica para otras células además de la bacteria, al impedir la producción normal de las proteínas necesarias. De manera que la piromicina es un medicamento demasiado peligroso para ser utilizado igual que la estreptomicina.

Virus

Para la mayoría de la gente acaso resulte desconcertante el hecho de que los «medicamentos milagrosos» sean tan eficaces contra las enfermedades bacteriológicas y tan poco contra las producidas por virus. Si después de todo los virus sólo pueden originar enfermedades si logran reproducirse, ¿por qué no habría de ser posible entorpecer el metabolismo de los virus, como se hace con las bacterias? La respuesta es muy sencilla e incluso evidente, con sólo tener en cuenta el sistema de reproducción de los virus. En su calidad de parásito absoluto, incapaz de multiplicarse como no sea dentro de una célula viva, el virus posee escaso metabolismo propio, si es que acaso lo tiene. Para hacer fenocopias depende totalmente de las materias suministradas por la célula que invade, y, por tanto, resulta, difícil privarle de tales materias o entorpecer su metabolismo sin destruir la propia célula, Hasta fecha muy reciente no descubrieron los biólogos los virus, tras la serie de tropiezos con formas de vida cada vez más simples. Acaso resulte adecuado iniciar esta historia con el descubrimiento de las causas de la malaria.
Un año tras otro, la malaria probablemente ha matado más gente en el mundo que cualquier otra dolencia infecciosa, ya que, hasta épocas recientes alrededor del 10 % de la población mundial padecía dicha enfermedad, que causaba tres millones de muertes al año. Hasta 1880 se creía que tenía su origen en el aire contaminado *(mala aria* en italiano) de las regiones pantanosas. Pero entonces, un bacteriólogo francés, Charles-Louis-Alphonse Laveran, descubrió que los glóbulos rojos de los individuos atacados de malaria estaban infestados con protozoos parásitos del

género *Plasmodium.* (Laveran fue galardonado con el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1907, por este descubrimiento.)
En los primeros años de la década de 1890, un médico británico llamado Patrick Manson, que dirigiera el hospital de una misión en Hong Kong, observó que en las regiones pantanosas pululaban los mosquitos al igual que en la atmósfera insana y sugirió que acaso los mosquitos tuvieran algo que ver con la propagación de la malaria. En la India, un médico británico, Ronald Ross, aceptó la idea y pudo demostrar que el parásito de la malaria pasaba en realidad parte del ciclo de su vida en mosquitos del género *Anopheles.* El mosquito recogía el parásito chupando la sangre de una persona infectada y luego se lo transmitía a toda persona que picaba.
Por su trabajo al sacar a luz, por vez primera, la transmisión de una enfermedad por un insecto «vector», Ross recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología, en 1902.
Fue un descubrimiento crucial de la medicina moderna, por demostrar que se puede combatir una enfermedad matando al insecto que la transmite. Basta con desecar los pantanos donde se desarrollan los mosquitos, con eliminar las aguas estancadas, con destruir los mosquitos por medio de insecticidas y se detendrá la enfermedad. Desde la Segunda Guerra Mundial, de esta forma se han visto libres de malaria extensas zonas del mundo, y la cifra de muertes por esta enfermedad ha descendido, por lo menos, en una tercera parte.
La malaria fue la primera enfermedad infecciosa cuya trayectoria se ha seguido hasta un microorganismo no bacteriológico (en este caso, un protozoo). Casi al mismo tiempo se siguió la pista a otra enfermedad no bacteriológica con una causa similar. Se trataba de la mortal fiebre amarilla, que en 1898, durante una epidemia en Río de Janeiro, mataba nada menos que casi al 95 % de los que la contrajeron. En 1899, al estallar en Cuba una epidemia de fiebre amarilla, se desplazó a aquel país, desde los Estados Unidos, una comisión investigadora, encabezada por el bacteriólogo Walter Reed, para tratar de averiguar las causas de la enfermedad.
Reed sospechaba que, tal como acababa de demostrarse en el caso del transmisor de la malaria, se trataba de un mosquito vector. En primer lugar, dejó firmemente establecido que la enfermedad no podía transmitirse por contacto directo entre los pacientes y los médicos o a través de la ropa de vestir o de cama del enfermo.
Luego, algunos de los médicos se dejaron picar deliberadamente por mosquitos que con anterioridad habían picado a un hombre enfermo de fiebre amarilla. Contrajeron la enfermedad, muriendo uno de aquellos valerosos investigadores, Jesse William Lazear.
Pero se identificó al culpable como el mosquito *Aedes aegypti.*
Quedó controlada la epidemia en Cuba, y la fiebre amarilla ya no es una enfermedad peligrosa en aquellas partes del mundo en las que la Medicina se encuentra más adelantada.
Como tercer ejemplo de una enfermedad no bacteriológica tenemos la fiebre tifoidea. Esta infección es endémica en África del Norte y llegó a Europa vía España durante la larga lucha de los españoles contra los árabes.
Comúnmente conocida como «plaga», es muy contagiosa y ha devastado naciones. Durante la Primera Guerra Mundial, los ejércitos austríacos hubieron de retirarse de Servia a causa del tifus, cuando el propio ejército servio no hubiera logrado rechazarlos. Los estragos causados por el tifus en Polonia y Rusia durante esa misma guerra y después de ella (unos tres millones de personas murieron a causa de dicha enfermedad) contribuyeron tanto a arruinar a esas naciones como la acción militar.
Al iniciarse el siglo xx, el bacteriólogo francés Charles Nicolle, por entonces al frente del «Instituto Pasteur» de Túnez, observó que, mientras el tifus imperaba en la ciudad, en el hospital nadie lo contraía. Los médicos y enfermeras estaban en contacto diario con los pacientes atacados de tifus y el hospital se encontraba abarrotado; sin embargo, en él no se produjo contagio alguno de la enfermedad. Nicolle analizó cuanto ocurría al llegar un paciente al hospital y le llamó la atención el hecho de que el cambio más significativo se relacionaba con el lavado del paciente y el despojarle de sus ropas infestadas de piojos.

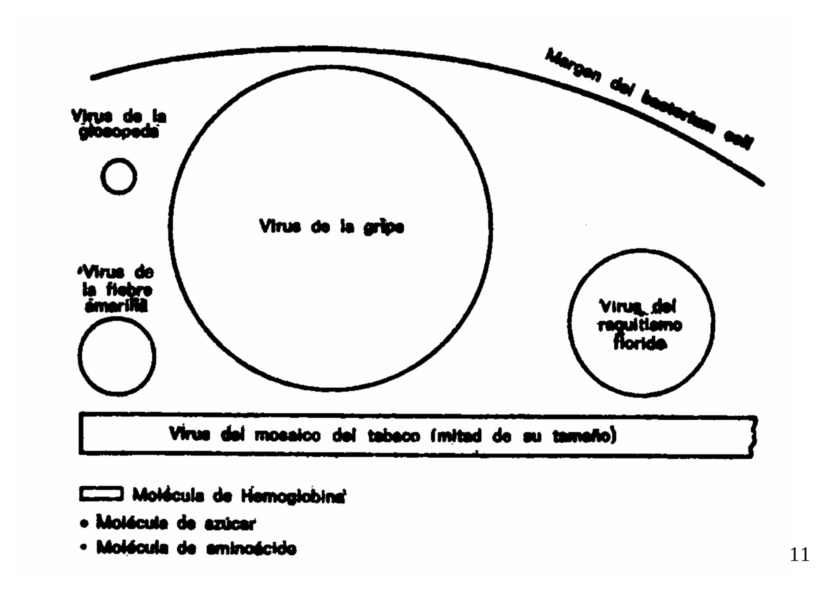
Nicolle quedó convencido de que aquel parásito corporal debía ser el vector del tifus. Demostró con experimentos lo acertado de su suposición. En 1928, recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología por su descubrimiento. Gracias a dicho descubrimiento y a la aparición del DDT, la fiebre tifoidea no repitió su mortífera transmisión durante la Segunda Guerra Mundial. En enero de 1944, se comenzó a usar el DDT contra el parásito corporal. Se roció en masa a la población de Nápoles y los piojos murieron. Por vez primera en la Historia se contuvo una epidemia de tifus invernal (cuando la abundancia de ropa, que no se cambia con frecuencia, hace casi segura y casi universal la invasión de piojos). En Japón se contuvo una epidemia similar a finales de 1945 después de la ocupación americana. La Segunda Guerra Mundial se convirtió casi en única entre todas las guerras de la Historia, gracias al dudoso mérito de haber aniquilado más gente con cañones y bombas que las fallecidas por enfermedad.



Ciclo vital del microorganismo de la malaria.

El tifus, al igual que la fiebre amarilla, tiene su origen en un agente más pequeño que una bacteria; ahora habremos de introducirnos en el extraño y maravilloso reino poblado de organismos subbacteriológicos.
Para tener una ligera idea de las dimensiones de los objetos en ese mundo, considerémoslos en orden de tamaño decreciente. El óvulo humano tiene un diámetro de unas cien micras (cien millonésimas de metro) y apenas resulta visible a simple vista. El paramecio, un gran protozoo, que a plena luz puede vérsele mover en una gota de agua, tiene aproximadamente el mismo tamaño. Una célula humana ordinaria mide solo 1/10 de su tamaño (alrededor de diez micras de diámetro), y es totalmente invisible sin microscopio. Aún más pequeño es el hematíe que mide unas siete micras de diámetro máximo. La bacteria, que se inicia con especies tan grandes como las células ordinarias, decrece a niveles más diminutos; la bacteria de tipo medio en forma de vástago mide tan sólo dos micras de longitud y las bacterias más pequeñas son esferas de un diámetro no superior a 4/10 de micra. Apenas pueden distinguirse con un microscopio corriente.
Al parecer, los organismos han alcanzado a tal nivel el volumen más pequeño posible en que puede desarrollarse toda la maquinaria de metabolismo necesaria para una vida independiente. Cualquier organismo más pequeño ya no puede constituir una célula con vida propia y ha de vivir como parásito. Por así decirlo, tiene que desprenderse de casi todo el metabolismo enzimático. Es incapaz de crecer o multiplicarse sobre un suministro artificial de alimento, por grande que éste sea; en consecuencia, no puede cultivarse en un tubo de ensayo como se hace con las bacterias. El único lugar en que puede crecer es en una célula viva, que le suministra las enzimas de que carece. Naturalmente, un parásito semejante crece y se multiplica a expensas de la célula que lo alberga.
Un joven patólogo americano llamado Howard Taylor Ricketts fue el descubridor de la primera subbacteria. En 1909 se encontraba estudiando una enfermedad llamada fiebre manchada de las Montañas Rocosas, propagada por garrapatas (artrópodos

chupadores de sangre, del género de las arañas más que de los insectos). Dentro de las células infectadas encontró «cuerpos de inclusión», que resultaron ser organismos muy diminutos llamados hoy día «rickettsia» en su honor. Durante el proceso seguido para establecer pruebas de este hecho, el descubridor contrajo el tifus y murió en 1910 a los 38 años de edad.



[11]

La rickettsia es aún lo bastante grande para poder atacarla con antibióticos tales como el cloranfenicol y las tetraciclinas. Su diámetro oscila desde cuatro quintos a un quinto de micra. Al parecer, aún poseen suficiente metabolismo propio para diferenciarse de las células que los albergan en su reacción a los medicamentos. Por tanto, la terapéutica antibiótica ha reducido en forma considerable el peligro de las enfermedades rickettsiósicas.

Por último, al final de la escala se encuentran los virus. Superan a la rickettsia en tamaño; de hecho, no existe una divisoria entre la rickettsia y los virus. Pero el virus más pequeño es, desde luego, diminuto. Por ejemplo, el virus de la fiebre amarilla tiene un diámetro que alcanza tan sólo un 1/50 de micra. Los virus son demasiado pequeños para poder distinguirlos en una célula y para ser observados con cualquier clase de microscopio óptico. El tamaño promedio de un virus es tan sólo un 1/1.000 del de una bacteria promedio.

Un virus está prácticamente desprovisto de toda clase de metabolismo. Depende casi totalmente del equipo enzimático de la célula que lo alberga. Algunos de los virus más grandes se ven afectados por determinados antibióticos, pero los medicamentos carecen de efectividad contra los virus diminutos.

Ya se sospechaba la existencia de virus mucho antes de que finalmente llegaran a ser vistos. Pasteur, en el curso de sus estudios sobre hidrofobia, no pudo encontrar organismo alguno del que pudiera sospecharse con base razonable que fuera el causante de la enfermedad. Y antes de decidirse a admitir que su teoría sobre los gérmenes de las enfermedades estaba equivocada, Pasteur sugirió que, en tal caso, el germen era sencillamente demasiado pequeño para ser visto. Y tenía razón.

En 1892, un bacteriólogo ruso, Dmitri Ivanovski, mientras estudiaba el «mosaico del tabaco», enfermedad que da a las hojas de la planta del tabaco una apariencia manchada, descubrió que el jugo de las hojas infectadas podía transmitir la enfermedad si se le aplicaba a las hojas de plantas saludables. En un esfuerzo por acorralar a los gérmenes, coló el jugo con filtros de porcelana, cuyos agujeros eran tan finos que ni siquiera las bacterias más diminutas podían pasar a través de ellos. Pero aún así el jugo filtrado seguía contagiando a las plantas de tabaco. Ivanovski llegó a la conclusión de que sus filtros eran defectuosos y que en realidad dejaban pasar las bacterias.

Un bacteriólogo holandés, Martinus Willem Beijerinck, repitió el experimento en 1897 y llegó a la conclusión de que el agente transmisor de la enfermedad era lo suficientemente pequeño para

---

[11] Tamaños relativos de sustancias simples y proteínas, así como de diversas partículas y bacterias. (Una pulgada y media de esta escala = 1/10.000 de milímetro en su tamaño real.)

pasar a través del filtro. Como nada podía ver en el fluido claro y contagioso con ningún microscopio, y como tampoco podía hacerlo desarrollarse en un cultivo de tubo de ensayo, pensó que el agente infeccioso debía ser una molécula pequeña, acaso tal vez del tamaño de una molécula de azúcar. Beijerinck nombró al agente infeccioso «virus filtrable» (virus es un vocablo latino que significa «veneno»).

Aquel mismo año, un bacteriólogo alemán, Friedrich August Johannes Löffler, descubrió que el agente causante de la fiebre aftosa (la glosopeda) entre el ganado pasaba también a través del filtro, y en 1901, Walter Reed, en el curso de sus investigaciones sobre la fiebre amarilla, descubrió que el agente infeccioso origen de dicha enfermedad era también un virus filtrable.

En 1914, el bacteriólogo alemán Walther Kruse demostró la acción del frío en los virus.

En 1931, se sabía que alrededor de cuarenta enfermedades (incluidas sarampión, parotiditis, varicela, poliomielitis e hidrofobia) eran causadas por virus, pero aún seguía siendo un misterio la naturaleza de tales virus. Pero entonces un bacteriólogo inglés, WilIiam J. Elford, empezó finalmente a capturar algunos en filtros y a demostrar que, al menos, eran partículas materiales de alguna especie. Utilizó membranas finas de colodión, graduadas para conservar partículas cada vez más pequeñas y así prosiguió hasta llegar a membranas lo suficientemente finas para separar al agente infeccioso de un líquido. Por la finura de la membrana capaz de retener al agente de una enfermedad dada, fue capaz de calibrar el tamaño de dicho virus. Descubrió que Beijerinck se había equivocado; ni siquiera el virus más pequeño era más grande que la mayor parte de las moléculas. Los virus más grandes alcanzaban aproximadamente el tamaño de la rickettsia.

Durante algunos de los años siguientes, los biólogos debatieron la posibilidad de que los virus fueran partículas vivas o muertas. Su habilidad para multiplicarse y transmitir enfermedades sugerían, ciertamente, que estaban vivas. Pero, en 1935, el bioquímico americano Wendell Meredith Stanley presentó una prueba que parecía favorecer en alto grado la tesis de que eran partículas «muertas». Machacó hojas de tabaco sumamente infectadas con el virus del mosaico del tabaco y se dedicó a aislar el virus en la forma más pura y concentrada que le fue posible, recurriendo, a tal fin, a las técnicas de separación de proteínas. El éxito logrado por Stanley superó toda esperanza, ya que logró obtener el virus en forma cristalina. Su preparado resultó tan cristalino como una molécula cristalizada y, sin embargo, era evidente que el virus seguía intacto; al ser disuelto de nuevo en el líquido seguía tan infeccioso como antes. Por su cristalización del virus, Stanley compartió, en 1946, el premio Nobel de Química con Sumner y Northrop, los cristalizadores de enzimas (véase el capítulo II).

Aún así, durante los veinte años que siguieron al descubrimiento de Stanley, los únicos virus que pudieron ser cristalizados fueron los «virus de las plantas», en extremo elementales (o sea, los que infectan las células de las plantas). Hasta 1955 no apareció cristalizado el primer «virus animal». En ese año, Carlton E. Schwerdt y Frederick L. Schaffer cristalizaron el virus de la poliomielitis.

El hecho de poder cristalizar los virus pareció convencer a muchos, entre ellos al propio Stanley, de que se trataba de proteínas muertas. Jamás pudo ser cristalizado nada en que alentara la vida, pues la cristalización parecía absolutamente incompatible con la vida. Esta última era flexible, cambiante, dinámica; un cristal era rígido, fijo, ordenado de forma estricta, y, sin embargo, era inmutable el hecho de que los virus eran infecciosos, de que podían crecer y multiplicarse, aún después de haber sido cristalizados. Y tanto el crecimiento como la reproducción fueron siempre considerados como esencia de vida.

Y al fin se produjo la crisis cuando dos bioquímicos británicos, Frederick Ch. Bawden y Norman W. Pirie demostraron que el virus del mosaico del tabaco ¡contenía ácido ribonucleico! Desde luego, no mucho; el virus estaba construido por un 94 % de proteínas y tan sólo un 6 % de ARN. Pero, pese a todo, era, de forma tajante, una nucleoproteína. Y lo que es más, todos los demás virus demostraron ser nucleoproteínas, conteniendo ARN o ADN, e incluso ambos.

La diferencia entre ser nucleoproteína o, simplemente, proteína es prácticamente la misma que existe entre estar vivo o muerto.
Resultó que los virus estaban compuestos de la misma materia que los genes y estos últimos constituyen la esencia propia de la vida.
Los virus más grandes tienen toda la apariencia de ser series de genes o cromosomas «sueltos». Algunos llegan a contener 75 genes, cada uno de los cuales regula la formación de algún aspecto de su estructura: Una fibra aquí, un pliegue allí. Al producir mutaciones en el ácido nucleico, uno u otro gen puede resultar defectuoso, y de este modo, puedan ser determinadas tanto su función como su localización. El análisis genético total (tanto estructural como funcional) de un virus es algo factible, aunque, por supuesto, esto no representa más que un pequeño paso hacia un análisis similar total de los organismos celulares, con su equipo genético mucho más elaborado.
Podemos representar a los virus en la célula como un invasor que, dejando a un lado los genes supervisores, se apoderan de la química celular en su propio provecho, causando a menudo en el proceso la muerte de la célula o de todo el organismo huésped. A veces puede darse el caso de que un virus sustituya a un gen o a una serie de genes por los suyos propios, introduciendo nuevas características, que pueden ser transmitidas a células hijas. Este fenómeno se llama *transducción.*
Si los genes; contienen las propiedades de la «vida» de una célula, entonces los virus son cosas vivas. Naturalmente que depende en gran modo de cómo definamos la vida. Por nuestra parte, creo que es justo considerar viva cualquier molécula de nucleoproteína capaz de dar respuesta, y según esa definición, los virus están tan vivos como los elefantes o los seres vivientes.
Naturalmente, nunca son tan convincentes las pruebas indirectas de la existencia de virus, por numerosas que sean, como el contemplar uno. Al parecer, el primer hombre en posar la mirada sobre un virus fue un médico escocés llamado John Brown Buist. En 1887, informó que en el fluido obtenido de una ampolla por vacunación había logrado distinguir con el microscopio algunos puntos diminutos. Es de presumir que se tratara de los virus de la vacuna, los más grandes que se conocen.
Para ver bien, o incluso para ver simplemente, un virus típico, se necesita algo mejor que un microscopio ordinario. Ese algo mejor fue inventado, finalmente, en los últimos años de la década de 1930; se trata del microscopio electrónico; este aparato puede alcanzar ampliaciones de hasta 100.000 y permite contemplar objetos tan pequeños de hasta 1/1.000 de micra de diámetro.
El microscopio electrónico tiene sus inconvenientes. El objeto ha de colocarse en un vacío y la deshidratación, que resulta inevitable, puede hacerle cambiar de forma.
Un objeto tal como una célula tiene que hacerse en extremo delgada. La imagen es tan sólo bidimensional; además los electrones tienden a atravesar una materia biológica, de manera que no se mantiene sobre el fondo.
En 1944, un astrónomo y físico americano, Robley Cook Williams y el microscopista electrónico Ralph Walter Graystone Wyckoff, trabajando en colaboración, concibieron una ingeniosa solución a estas últimas dificultades.
A Williams se le ocurrió, en su calidad de astrónomo, que al igual que los cráteres y montañas de la Luna adquieren relieve mediante sombras cuando la luz del sol cae sobre ellos en forma oblicua, podrían verse los virus en tres dimensiones en el microscopio electrónico si de alguna forma pudiera lograrse el que reflejaran sombras. La solución que se les ocurrió a los experimentadores fue la de lanzar metal vaporizado oblicuamente a través de las partículas de virus colocadas en la platina del microscopio. La corriente de metal dejaba un claro espacio —una «sombra»— detrás de cada partícula de virus. La longitud de la sombra indicaba la altura de la partícula bloqueadora, y al condensarse el metal en una fina película, delineaba también claramente las partículas de virus sobre el fondo.
De esa manera, las fotografías de sombras de diversos virus denunciaron sus formas. Se descubrió que el virus de la vacuna era algo semejante a un barril. Resultó ser del grueso de unas 0,25 micras, aproximadamente el tamaño de la más pequeña de las

rickettsias. El virus del mosaico del tabaco era semejante a un delgado vástago de 0,28 micras de longitud por 0,015 micras de ancho. Los virus más pequeños, como los de la poliomielitis, la fiebre amarilla y la fiebre aftosa (glosopeda), eran esferas diminutas, oscilando su diámetro desde 0,025 hasta 0.020 micras. Esto es considerablemente más pequeño que el tamaño calculado de un solo gen humano. El peso de estos virus es tan sólo alrededor de 100 veces el de una molécula promedio de proteína. Los virus del mosaico del bromo, los más pequeños conocidos hasta ahora, tienen un peso molecular de 4,5. Es tan sólo una décima parte del tamaño del mosaico del tabaco y acaso goce del título de la «cosa viva más pequeña».

En 1959, el citólogo finlandés Alvar P. Wilska concibió un microscopio electrónico que utilizaba electrones de «velocidad reducida». Siendo menos penetrantes que los electrones de «velocidad acelerada», pueden revelar algunos de los detalles internos de la estructura de los virus. Y en 1961, el citólogo francés Gaston DuPouy ideó la forma de colocar las bacterias en unas cápsulas, llenas de aire, tomando de esta forma vistas de las células vivas con el microscopio electrónico. Sin embargo, en ausencia del metal proyector de sombras se perdía detalle.

Los virólogos han comenzado en la actualidad a separar los virus y a unirlos de nuevo. Por ejemplo, en la Universidad de California, el bioquímico germano americano Heinz Fraenkel-Conrat, trabajando con Robley Williams, descubrió que un delicado tratamiento químico descomponía la proteína del virus del mosaico del tabaco en unos 2.200 fragmentos consistentes en cadenas peptídicas formadas cada una por 158 aminoácidos y con pesos moleculares individuales de 18.000. En 1960 se descubrió totalmente la exacta composición aminoácida de estas unidades virus-proteína. Al disolverse tales unidades, tienden a soldarse para formar otra vez el vástago largo y cóncavo (en cuya forma existen en el virus original). Se mantienen juntas las unidades con átomos de calcio y magnesio.

En general, las unidades virus-proteína, al combinarse, forman dibujos geométricos. Las del virus del mosaico del tabaco que acabamos de exponer forman segmentos de una hélice. Las sesenta subunidades de la proteína del virus de la poliomielitis están ordenadas en 12 pentágonos. Las veinte subunidades del virus iridiscente *Tipula* están ordenadas en una figura regular de veinte lados, un icosaedro.

La proteína del virus es cóncava. Por ejemplo, la hélice de la proteína del virus del mosaico del tabaco está formada por 130 giros de la cadena peptídica, que producen en su interior una cavidad larga y recta. Dentro de la concavidad de la proteína se encuentra la posición del ácido nucleico del virus. Puede ser ADN o ARN, pero, en cualquier caso, está formada por un mínimo de 6.000 nucleátidos.

Fraenkel-Conrat separó el ácido nucleico y la porción de proteínas en los virus del mosaico del tabaco y trató de averiguar si cada una de esas porciones podía infectar independientemente la célula. Quedó demostrado que individualmente no podían hacerlo, pero cuando unió de nuevo la proteína y el ácido nucleico quedó restaurado hasta el 50 % del poder infeccioso original de la muestra de virus.

¿Qué había ocurrido? A todas luces, una vez separados la proteína y el ácido nucleico del virus ofrecían toda la apariencia de muertos; y, sin embargo, al unirlos nuevamente, al menos parte de la materia parecía volver a la vida. La Prensa vitoreó el experimento de Fraenkel-Conrat como la creación de un organismo vivo creado de materia inerte. Estaban equivocados, como veremos a continuación.

Al parecer, había tenido lugar una nueva combinación de proteína y ácido nucleico. Y por lo que podía deducirse, cada uno de ellos desempeñaba un papel en la infección. ¿Cuáles eran las respectivas funciones de la proteína y el ácido nucleico y cuál de ellas era más importante? Fraenkel-Conrat realizó un excelente experimento que dejó contestada la pregunta. Mezcló la parte de proteína correspondiente a una cadena del virus con la porción de ácido nucleico de otra cadena. Ambas partes se combinaron para formar un virus infeccioso ¡con una mezcla de propiedades! Su virulencia (o sea, el grado de potencia para infectar las plantas de

tabaco) era igual a la de la cadena de virus que aportara la proteína; la enfermedad a que dio origen (o sea la naturaleza del tipo de mosaico sobre la hoja) era idéntica a la de la cadena de virus que aportara el ácido nucleico.

Dicho descubrimiento respondía perfectamente a lo que los virólogos ya sospechaban con referencia a las funciones respectivas de la proteína y el ácido nucleico. Al parecer, cuando un virus ataca a una célula, su caparazón o cubierta proteínica le sirve para adherirse a la célula y para abrir una brecha que le permita introducirse en ella. Entonces, su ácido nucleico invade la célula e inicia la producción de partículas de virus.

Una vez que el virus de Fraenkel-Conrat hubo infectado una hoja de tabaco, las nuevas generaciones de virus que fomentara en las células de la hoja resultaron ser no un híbrido, sino una réplica de la cadena que contribuyera al ácido nucleico. Reproducía dicha cadena no sólo en el grado de infección, sino también en el tipo de enfermedad producida. En otras palabras, el ácido nucleico había dictado la construcción de la nueva capa proteínica del virus. Había producido la proteína de su propia cadena, no la de otra cadena con la cual le combinaran para formar el híbrido.

Esto sirvió para reforzar la prueba de que el ácido nucleico constituía la parte «viva» de un virus, o, en definitiva, de cualquier nucleoproteína. En realidad, Fraenkel-Conrat descubrió en ulteriores experimentos que el ácido nucleico puro del virus puede originar por sí solo una pequeña infección en una hoja de tabaco, alrededor del 0,1 % de la producida por el virus intacto. Aparentemente, el ácido nucleico lograba por sí mismo abrir brecha de alguna forma en la célula.

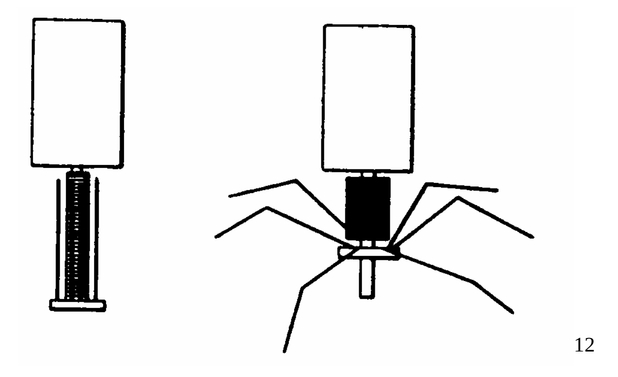
De manera que el hecho de unir el ácido nucleico y la proteína para formar un virus no da como resultado la creación de vida de una materia inerte; la vida ya está allí en forma de ácido nucleico. La proteína sirve simplemente para proteger el ácido nucleico contra la acción de enzimas hidrolizantes («nucleasas») en el ambiente y para ayudarle a actuar con mayor eficiencia en su tarea de infección y reproducción. Podemos comparar la fracción de ácido nucleico a un hombre y la fracción proteína a un automóvil. La combinación facilita el trabajo de viajar de un sitio a otro. El automóvil jamás podría hacer el viaje por sí mismo. El hombre podría hacerlo a pie (y ocasionalmente lo hace), pero el automóvil representa una gran ayuda.

La información más clara y detallada del mecanismo por el cual los virus infectan una célula procede de los estudios sobre los virus denominados, bacteriófagos, descubiertos, por vez primera, por el bacteriólogo inglés Frederick William Twort, en 1915 y, de forma independiente, por el bacteriólogo canadiense Felix Hubert d'Hérelle, en 1917. Cosa extraña, estos virus son gérmenes que van a la caza de gérmenes, principalmente bacterias. D'Hérelle les adjudicó el nombre de «bacteriófagos», del griego «devorador de bacteria».

Los bacteriófagos se prestan maravillosamente al estudio, porque pueden ser cultivados en un tubo de ensayo juntamente con los que los albergan. El proceso de infección y multiplicación procede como a continuación se indica.

Un bacteriófago típico (comúnmente llamado «fago» por quienes trabajan con el animal de rapiña) tiene la forma de un diminuto renacuajo, con una cabeza roma y una cola. Con el microscopio electrónico, los investigadores han podido ver que el fago lo primero que hace es apoderarse de la superficie de una bacteria con su cola. Cabe suponer que lo hace así porque el tipo de carga eléctrica en la punta de la cofa (determinada por aminoácidos cargados) se adapta al tipo de carga en ciertas porciones de la superficie de la bacteria. La configuración de las cargas opuestas que se atraen, en la cola y en la superficie de la bacteria, se adaptan en forma tan perfecta que se unen algo así como con el clic de un perfecto engranaje. Una vez que el virus se ha adherido a su víctima con la punta de su cola, practica un diminuto orificio en la pared de la célula, quizá por mediación de una enzima que hiende las moléculas en aquel punto. Por lo que puede distinguirse con el microscopio electrónico, allí nada está sucediendo. El fago, o al menos su caparazón visible, permanece adherido a la parte exterior de la bacteria. Dentro de la célula bacterial tampoco existe

actividad visible. Pero al cabo de veinte minutos la célula se abre derramando hasta 200 virus completamente desarrollados.


[12]

Es evidente que tan sólo el caparazón de la proteína del virus atacante permanece fuera de la célula. El ácido nucleico contenido dentro del caparazón del virus se derrama dentro de la bacteria a través del orificio practicado en su pared por la proteína. El bacteriólogo americano Alfred Day Hershey demostró por medio de rastreadores radiactivos que la materia invasora es tan sólo ácido nucleico sin mezcla alguna visible de proteína. Marcó los fagos con átomos de fósforo y azufre radiactivos (cultivándolos en bacterias a la que se incorporaron esos radioisótopos por medio de su alimentación). Ahora bien, tanto las proteínas como los ácidos nucleicos tienen fósforo, pero el azufre sólo aparecerá en las proteínas, ya que el ácido nucleico no lo contiene.
Por tanto, si un fago marcado con ambos rastreadores invadiera una bacteria y su progenie resultara con fósforo radiactivo, pero no con radioazufre, el experimento indicaría que el virus paterno del ácido nucleico había entrado en la célula, pero no así la proteína. La ausencia de azufre radiactivo indicaría que todas las proteínas de la progenie del virus fueron suministradas por la bacteria que lo albergaba. De hecho, el experimento dio este último resultado; los nuevos virus contenían fósforo radiactivo (aportado por el progenitor), pero no azufre radiactivo.
Una vez más quedó demostrado el papel predominante del ácido nucleico en el proceso de la vida. Aparentemente, tan sólo el ácido nucleico del fago se había introducido en la bacteria y una vez allí dirigió la formación de nuevos virus —con proteína y todo— con las materias contenidas en la célula. Ciertamente, el virus de la patata, huso tubercular, cuya pequeñez es insólita, parece ser ácido nucleico sin envoltura proteínica.
Por otra parte, es posible que el ácido nucleico no fuera absolutamente vital para producir los efectos de un virus. En 1967 se descubrió que una enfermedad de la oveja, denominada «scrapie», tenía por origen unas partículas con un peso molecular de 700.000, es decir, considerablemente inferiores a cualquier otro virus conocido, y, lo que es más importante, carentes de ácido nucleico. La partícula puede ser un «represor», que altera la acción del gen en la célula hasta el punto de promover su propia formación. Así, el invasor no sólo utiliza para sus propios designios las enzimas de la célula, sino incluso los genes. Esto tiene fundamental importancia para el hombre debido al hecho de que la enfermedad humana denominada esclerosis múltiple puede estar relacionada con la «scrapie».

Inmunidad

Los virus constituyen los enemigos más formidables del hombre, sin contar el propio hombre. En virtud de su íntima asociación con las propias células del cuerpo, los virus se han mostrado absolutamente invulnerables al ataque de los medicamentos o a cualquier otra arma artificial, y aún así, el hombre ha sido capaz de resistir contra ellos, incluso en las condiciones más desfavorables. El organismo humano está dotado de impresionantes defensas contra la enfermedad.

---
[12] Modelo de bacteriófago T-2, un virus con forma de renacuajo que se alimenta de otros gérmenes, en su forma «cerrada» (izquierda). Y «abierta» (derecha).

Analicemos la peste negra, la gran plaga del siglo XIV. Atacó a una Europa que vivía en una aterradora suciedad, carente de cualquier concepto moderno de limpieza e higiene, sin instalación de cañerías de desagüe, sin forma alguna de tratamiento médico razonable, una población aglutinada e indefensa. Claro que la gente podía huir de las aldeas infestadas, pero el enfermo fugitivo tan sólo servía para propagar las epidemias más lejos y con mayor rapidez. Pese a todo ello, tres cuartas partes de la población resistió con éxito los ataques de la infección. En tales circunstancias, lo realmente asombroso no fue que muriera uno de cada cuatro, sino que sobrevivieran tres de cada cuatro.

Es evidente que existe eso que se llama la resistencia natural frente a cualquier enfermedad. De un número de personas expuestas gravemente a una enfermedad contagiosa, algunos la sufren con carácter relativamente débil, otros enferman de gravedad y un cierto número muere. Existe también lo que se denomina inmunidad total, a veces congénita y otras adquirida. Por ejemplo, un solo ataque de sarampión, paperas o varicela, deja por lo general inmune a una persona para el resto de su vida frente a aquella determinada enfermedad.

Y resulta que esas tres enfermedades tienen su origen en un virus. Y, sin embargo, se trata de infecciones relativamente de poca importancia, rara vez fatales. Corrientemente, el sarampión produce tan sólo síntomas ligeros, al menos en los niños. ¿Cómo lucha el organismo contra esos virus, fortificándose luego de forma que, si el virus queda derrotado, jamás vuelve a atacar? La respuesta a esa pregunta constituye un impresionante episodio de la moderna ciencia médica, y para iniciar el relato hemos de retroceder a la conquista de la viruela.

Hasta finales del siglo XVIII, la viruela era una enfermedad particularmente temible, no sólo porque resultaba con frecuencia fatal, sino también porque aquellos que se recuperaban quedaban desfigurados de modo permanente. Si el caso era leve, dejaba marcado el rostro; un fuerte ataque podía destruir toda belleza e incluso toda huella de humanidad. Un elevado porcentaje de la población ostentaba en sus rostros la marca de la viruela. Y quienes aún no la habían sufrido vivían con el constante temor de verse atacados por ella.

En el siglo XVII, la gente, en Turquía, empezó a infectarse voluntariamente y de forma deliberada de viruela con la esperanza de hacerse inmunes a un ataque grave.

Solían arañarse con el suero de ampollas de una persona que sufriera un ataque ligero. A veces producían una ligera infección, otras la desfiguración o la muerte que trataran de evitar. Era una decisión arriesgada, pero nos da una idea del horror que se sentía ante dicha enfermedad el hecho de que la gente estuviera dispuesta a arriesgar ese mismo horror para poder huir de él.

En 1718, la famosa beldad Lady Mary Wortley Montagu tuvo conocimiento de dicha práctica durante su estancia en Turquía, acompañando a su marido enviado allí por un breve período como embajador británico, e hizo que inocularan a sus propios hijos. Pasaron la prueba sin sufrir daño. Pero la idea no arraigó en Inglaterra, quizás, en parte, porque se consideraba a Lady Montagu notablemente excéntrica. Un caso similar, en Ultramar, fue el de Zabdiel Boylston, médico americano. Durante una epidemia de viruela en Boston, inoculó a doscientas cuarenta y una personas, de las que seis murieron. Fue víctima, por ello, de considerables críticas.

En Gloucestershire, alguna gente del campo tenía sus propias ideas con respecto a la forma de evitar la viruela. Creían que un ataque de vacuna, enfermedad que atacaba a las vacas y, en ocasiones, a las personas, haría inmune a la gente, tanto frente a la vacuna como a la viruela. De ser verdad resultaría maravilloso, ya que la vacuna rara vez producía ampollas y apenas dejaba marcas. Un médico de Gloucestershire, el doctor Edward Jenner, decidió que acaso hubiera algo de verdad en la «superstición» de aquellas gentes. Observó que las lecheras tenían particular predisposición a contraer la vacuna y también, al parecer, a no sufrir las marcas de la viruela. (Quizá la moda en el siglo XVIII de aureolar de romanticismo a las hermosas lecheras se debiera al hecho del limpio cutis de éstas, que resultaba realmente bello en un mundo marcado por las viruelas.) ¿Era posible que la vacuna y la viruela

fueran tan semejantes, que una defensa constituida por el organismo contra la vacuna lo protegiera también contra la viruela? El doctor Jenner empezó a ensayar esa idea con gran cautela (probablemente haciendo experimentos, en primer lugar, con su propia familia). En 1796, se arriesgó a realizar la prueba suprema. Primero inoculó a un chiquillo de ocho años, llamado James Phipps, con vacuna, utilizando fluido procedente de una ampolla de vacuna en la mano de una lechera. Dos meses más tarde se presentó la parte crucial y desesperada del experimento. Jenner inoculó deliberadamente al pequeño James con la propia viruela.

El muchacho no contrajo la enfermedad. Había quedado inmunizado.

Jenner designó el proceso con el nombre de «vacunación», del latín *vaccinia*, nombre que se da a la vacuna. La vacunación se propagó por Europa como un incendio. Constituye uno de los raros casos de una revolución en la Medicina adoptada con facilidad y casi al instante, lo que da perfecta idea del pánico que inspiraba la viruela y la avidez del público por probar cualquier cosa prometedora de evasión. Incluso la profesión médica presentó tan sólo una débil oposición a la vacunación... aún cuando sus líderes ofrecieron cuanta resistencia les fue posible. Cuando, en 1813, se propuso la elección de Jenner para el Colegio Real de Médicos de Londres, se le denegó la admisión con la excusa de que no poseía conocimientos suficientes sobre Hipócrates y Galeno.

Hoy día, la viruela ha sido prácticamente desterrada de los países civilizados, aunque el terror que sigue inspirando sea tan fuerte como siempre. La comunicación de un solo caso en cualquier ciudad importante basta para catapultar virtualmente a toda la población hacia las clínicas a fin de someterse a revacunación.

Durante más de siglo y medio, los intentos por descubrir inoculaciones similares para otras enfermedades graves no dieron resultado alguno. Pasteur fue el primero en dar el siguiente paso hacia delante. Descubrió, de manera más o menos accidental, que podía transformar una enfermedad grave en benigna, mediante la debilitación del microbio que la originaba.

Pasteur trabajaba en una bacteria que causaba el cólera a los pollos. Concentró una preparación tan virulenta, que una pequeña dosis inyectada bajo la piel de un pollo lo mataba en un día. En una ocasión utilizó un cultivo que llevaba preparado una semana. Esta vez, los pollos enfermaron sólo ligeramente, recuperándose luego.

Pasteur llegó a la conclusión de que el cultivo se había estropeado y preparó un nuevo y virulento caldo. Pero su nuevo cultivo no mató a los pollos que se habían recuperado de la dosis de bacteria «estropeada». Era evidente que la infección con la bacteria debilitada había dotado a los pollos con una defensa contra las nuevas y virulentas bacterias.

En cierto modo, Pasteur había producido una «vacuna» artificial, para aquella «viruela» especial. Admitió la deuda filosófica que tenía con Jenner, denominando también vacunación a su procedimiento, aún cuando nada tenía que ver con la «vacuna». Desde entonces se ha generalizado el término para significar inoculaciones contra cualquier enfermedad, y la preparación utilizada a tal fin se llama «vacuna».

Pasteur desarrolló otros métodos para debilitar (o «atenuar») los agentes de la enfermedad. Por ejemplo, descubrió que cultivando la bacteria del ántrax a altas temperaturas se producía una cadena debilitada capaz de inmunizar a los animales contra la enfermedad. Hasta entonces, el ántrax había sido tan desesperadamente fatal y contagioso que tan pronto como una res caía víctima de él, había que matar y quemar a todo el rebaño.

Sin embargo, el mayor triunfo de Pasteur fue sobre el virus de la enfermedad llamada hidrofobia o «rabia» (del latín *rabies*, debido a que la enfermedad atacaba al sistema nervioso, produciendo síntomas similares a los de la locura). Una persona mordida por un perro rabioso, al cabo de un período de incubación de uno o dos meses, era atacada por síntomas violentos, falleciendo casi invariablemente de muerte horrible.

Pasteur no lograba localizar a un microbio visible como agente de la enfermedad (desde luego, nada sabía sobre virus), de manera que tenía que utilizar animales vivos para cultivarlo.
Acostumbraba a inyectar el fluido de infecciones en el cerebro de un conejo, lo dejaba incubar, machacaba la médula espinal, inyectaba el extracto en el cerebro de otro conejo, y así sucesivamente. Pasteur atenuaba sus preparados, dejándolos madurar y poniéndolos a prueba de manera continua hasta que el extracto ya no podía provocar la enfermedad en un conejo.
Entonces inyectó el virus atenuado en un perro, que sobrevivió. Al cabo de cierto tiempo infectó al perro con hidrofobia en toda su virulencia, descubriendo que el animal estaba inmunizado.
En 1885, le llegó a Pasteur la oportunidad de intentar la curación de un ser humano. Le llevaron a un muchacho de nueve años, Joseph Maister, a quien mordiera gravemente un perro rabioso.
Con vacilación y ansiedad considerables. Pasteur sometió al muchacho a inoculaciones cada vez menos atenuadas, esperando crear una resistencia antes de transcurrido el período de incubación. Triunfó. Al menos, el muchacho sobrevivió. (Meister se convirtió en el conserje del «Instituto Pasteur», y en 1940 se suicidó al ordenarle los militares nazis, en París, que abriera la tumba de Pasteur.)
En 1890, un médico militar alemán llamado Emil von Behring, que trabajaba en el laboratorio de Koch, puso a prueba otra idea.
¿Por qué correr el riesgo de inyectar el propio microbio, incluso en forma atenuada, en un ser humano? Sospechando que el agente de la enfermedad pudiera dar origen a que el organismo fabricara alguna sustancia defensiva, ¿no sería lo mismo infectar a un animal con el agente, extraer la sustancia defensiva que produjera e inyectarla en el paciente humano? Von Behring descubrió que su idea daba resultado. La sustancia defensiva se integraba en el suero sanguíneo, y Von Behring la denominó «antitoxina». Logró producir en los animales antitoxinas contra el tétanos y la difteria.
Su primera aplicación de la antitoxina diftérica a un niño que padecía dicha enfermedad obtuvo un éxito tan sensacional que se adoptó inmediatamente el tratamiento, logrando reducir en forma drástica el índice de mortandad por difteria.
Paul Ehrlich (que más tarde descubriría la «bala mágica» para la sífilis) trabajaba con Von Behring y fue él quien probablemente calculó las dosis apropiadas de antitoxina. Más adelante, separóse de Von Behring (Ehrlich era un individuo irascible, que fácilmente se enemistaba con cualquiera) y prosiguió trabajando solo, con todo detalle, en la terapéutica racional del suero. Von Behring recibió el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1901, el primer año que fue concedido. Ehrlich también fue galardonado con el Premio Nobel en 1908, juntamente con el biólogo ruso Meshnikov.
La inmunidad que confiere una antitoxina dura tan sólo mientras ésta permanece en la sangre. Pero el bacteriólogo francés Gaston Ramon descubrió que, tratando la toxina de la difteria o del tétanos con formaldehído o calor, podía cambiar su estructura de tal forma que la nueva sustancia (denominada «toxoide») podía inyectarse sin peligro alguno al paciente humano, en cuyo caso la antitoxina producida por el propio paciente dura más que la procedente de un animal; además, pueden inyectarse nuevas dosis del toxoide siempre que sea necesario para renovar la inmunidad.
Una vez introducido el toxoide en 1925, la difteria dejó de ser una aterradora amenaza.
También se utilizaron las reacciones séricas para descubrir la presencia de la enfermedad. El ejemplo más conocido es el de la «prueba de Wasserman», introducida por el bacteriólogo alemán August von Wasserman en 1906, para descubrir la sífilis. Estaba basada en técnicas desarrolladas primeramente por un bacteriólogo belga, Jules Bordet, quien trabajaba con fracciones de suero que llegaron a ser denominadas «complemento». En 1919, Bordet recibió por su trabajo el premio Nobel de Medicina y Fisiología.
La lucha laboriosa de Pasteur con el virus de la rabia demostró la dificultad de tratar con los virus. Las bacterias pueden cultivarse, manipularse y atenuarse por medios artificiales en el tubo de ensayos. Esto no es posible con el virus; sólo pueden cultivarse

sobre tejido vivo. En el caso de la viruela, los anfitriones vivos para la materia experimental (el virus de la vacuna) fueron las vacas y las lecheras. En el caso de la rabia, Pasteur recurrió a conejos. Pero, en el mejor de los casos, los animales vivos constituyen un medio difícil, caro y exigen gran pérdida de tiempo como medio para cultivar microorganismos.
En el primer cuarto de este siglo, el biólogo francés, Alexis Carrel, obtuvo considerable fama con un hecho que demostró poseer inmenso valor para la investigación médica... la conservación en tubos de ensayo de trocitos de tejidos vivos. Carrel llegó a interesarse por este tipo de investigación a través de su trabajo como cirujano. Desarrolló nuevos métodos de trasplante de vasos sanguíneos y órganos de animales, por cuyos trabajos recibió, en 1912, el premio Nobel de Medicina y Fisiología. Naturalmente, tenía que mantener vivo el órgano extraído mientras se preparaba a trasplantarlo. Desarrolló un sistema para alimentarlo que consistía en bañar el tejido con sangre y suministrar los diversos extractos e iones. Como contribución incidental, Carrel desarrolló, con la ayuda de Charles Augustus Lindbergh, un «corazón mecánico» rudimentario para bombear la sangre a través del tejido. Fue la vanguardia de los «corazones», «pulmones» y «riñones» artificiales cuyo uso se ha hecho habitual en cirugía.
Los procedimientos de Carrel eran lo bastante buenos para mantener vivo durante treinta y cuatro años un trozo de corazón de un pollo embrionario... una vida mucho más larga que la del propio pollo. Carrel intentó incluso utilizar sus cultivos de tejidos para desarrollar virus... y en cierto modo lo logró. La única dificultad consistía en que también crecía la bacteria en los tejidos y había que adoptar unas precauciones asépticas tan extremadas con el fin de mantener los virus puros, que resultaba más fácil recurrir a animales.
No obstante, la idea del embrión de pollo parecía la más acertada, por así decirlo. Mejor que sólo un trozo de tejido sería un todo... el propio embrión de pollo. Se trata de un organismo completo, protegido por la cáscara del huevo y equipado con sus propias defensas naturales contra la bacteria. También es barato y fácil de adquirir en cantidad. Y en 1931, el patólogo Ernest W. Goodpasture y sus colaboradores de la Universidad Vanderbilt lograron trasplantar un virus dentro de un embrión del pollo. Por vez primera pudieron cultivarse virus puros casi tan fácilmente como las bacterias.
En 1937 se logró la primera conquista médica de verdadera trascendencia con el cultivo de virus en huevos fértiles. En el Instituto Rockefeller, los bacteriólogos proseguían aún la búsqueda para una mayor protección contra el virus de la fiebre amarilla. Pese a todo, era imposible erradicar totalmente al mosquito y en los trópicos los monos infectados mantenían una reserva constante y amenazadora de la enfermedad. El bacteriólogo sudafricano Max Theiler, del Instituto, se dedicó a producir un virus atenuado de la fiebre amarilla. Hizo pasar el virus a través de doscientos ratones y cien embriones de pollo hasta obtener un mutante que, causando tan sólo leves síntomas, aún así proporcionaba la inmunidad absoluta contra la fiebre amarilla. Por este logro, Theiler recibió, en 1951, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.
Una vez en marcha, nada es superior al cultivo sobre placas de cristal, en rapidez, control de las condiciones y eficiencia. En los últimos años cuarenta, John Franklin Enders, Thomas Huckle Weller y Frederick Chapman Robbins, de la Facultad de Medicina de Harvard, volvieron al enfoque de Carrel. (Éste había muerto en 1944 y no sería testigo de su triunfo.) En esta ocasión disponían de un arma nueva y poderosa contra la bacteria contaminadora del tejido cultivado... los antibióticos. Incorporaron penicilina y estreptomicina al suministro de sangre que mantenía vivo el tejido y descubrieron que podían cultivar virus sin dificultad. Siguiendo un impulso, ensayaron con el virus de la poliomielitis. Asombrados, lo vieron florecer en aquel medio. Constituía la brecha por la que lograrían vencer a la polio, y los tres hombres recibieron, en 1954, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.
En la actualidad puede cultivarse el virus de la poliomielitis en un tubo de ensayo en lugar de hacerla sólo en monos (que son sujetos de laboratorio caros y temperamentales). Así fue posible la

experimentación a gran escala con el virus. Gracias a la técnica del cultivo de tejidos, Jonas E. Salk, de la Universidad de Pittsburgh, pudo experimentar un tratamiento químico del virus para averiguar que los virus de la polio, matados con formaldehído, pueden seguir produciendo reacciones inmunológicas en el organismo, permitiéndole desarrollar la hoy famosa vacuna Salk.
El importante índice de mortalidad alcanzado por la polio, su preferencia por los niños (hasta el punto de que ha llegado a denominársela «parálisis infantil»), el hecho de que parece tratarse de un azote moderno, sin (epidemias registradas con anterioridad a 1840 y, en particular, el interés mostrado en dicha enfermedad por su eminente víctima, Franklin D. Roosevelt, convirtió su conquista en una de las victorias más celebradas sobre una enfermedad en la historia de la Humanidad. Probablemente, ninguna comunicación médica fue acogida jamás con tanto entusiasmo como el informe, emitido en 1955 por la comisión evaluadora declarando efectiva la vacuna Salk. Desde luego, el acontecimiento merecía tal celebración, mucho más de lo que lo merecen la mayor parte de las representaciones que incitan a la gente a agolparse y tratar de llegar los primeros. Pero la ciencia no se nutre del enloquecimiento o la publicidad indiscriminada. El apresuramiento en dar satisfacción a la presión pública por la vacuna motivó que se pusieran en circulación algunas muestras defectuosas, generadoras de la polio, y el furor que siguió al entusiasmo hizo retroceder al programa de vacunación contra la enfermedad.
Sin embargo, ese retroceso fue subsanado y la vacuna Salk se consideró efectiva y, debidamente preparada, sin peligro alguno.
En 1957, el microbiólogo polaco-americano Albert Bruce Sabin dio otro paso adelante. No utilizó virus muerto, que de no estarlo completamente puede resultar peligroso, sino una cadena de virus vivos incapaces de producir la enfermedad por sí misma, pero capaces de establecer la producción de anticuerpos apropiados, Esta «vacuna Sabin» puede, además, tomarse por vía oral, no requiriendo, por tanto, la inyección. La vacuna Sabin fue adquiriendo popularidad, primero en la Unión Soviética y posteriormente en los países europeos del Este; en 1960, se popularizó también su empleo en los Estados Unidos, extinguiéndose así el temor a la poliomielitis.
Pero, exactamente, ¿cómo actúa una vacuna? La respuesta a esta pregunta puede darnos algún día la clave química de la inmunidad.
Durante más de medio siglo, los biólogos han considerado como «anticuerpos» las principales defensas del organismo contra la infección. (Desde luego, también están los glóbulos blancos llamados «fagocitos» que devoran las bacterias. Esto lo descubrió, en 1883, el biólogo ruso Ilia Ilich Meshnikov, que más tarde sucedería a Pasteur como director del Instituto Pasteur de París y que en 1908 compartiera el premio Nobel de Medicina y Fisiología con Ehrlich. Pero los fagocitos no aportan ayuda alguna contra los virus y no parece que tomen parte en el proceso de inmunidad que estamos examinando.) A un virus, o, en realidad, a casi todas las sustancias extrañas que se introducen en la química del organismo, se les llama «antígenos». El anticuerpo es una sustancia fabricada por el cuerpo para luchar contra el antígeno específico. Pone a éste fuera de combate, combinándose con él.
Mucho antes de que los químicos lograran dominar al anticuerpo, estaban casi seguros de que debía tratarse de proteínas. Por una parte, los antígenos más conocidos eran proteínas y era de presumir que únicamente una proteína lograría dar alcance a otra. Tan sólo una proteína podía tener la necesaria estructura sutil para aislarse y combinar con un antígeno determinado.
En los primeros años de la década de 1920, Landsteiner (el descubridor de los grupos sanguíneos) realizó una serie de experimentos que demostraron claramente que los anticuerpos eran, en realidad, en extremo específicos. Las sustancias que utilizara para generar anticuerpos no eran antígenos, sino compuestos mucho más simples, de estructura bien conocida. Eran los llamados «ácidos arsanílicos», compuestos que contenían arsénico. En combinación con una proteína simple, como, por ejemplo, la albúmina de la clara de huevo, un ácido arsanílico actuaba como antígeno; al ser inyectado en un animal, originaba un anticuerpo en el suero sanguíneo. Además, dicho anticuerpo

era especifico para el ácido arsanílico; el suero sanguíneo del animal aglutinaría tan sólo la combinación arsanílico-albúmina y no únicamente la albúmina. Desde luego, en ocasiones puede hacerse reaccionar el anticuerpo nada más que con el ácido arsanílico, sin combinarlo con albúmina. Landsteiner demostró también que cambios muy pequeños en la estructura del ácido arsanílico se reflejarían en el anticuerpo. Un anticuerpo desarrollado por cierta variedad de ácido arsanílico no reaccionaría con una variedad ligeramente alterada.

Landsteiner designó con el nombre de «haptenos» (del griego «hapto», que significa enlazar, anudar) aquellos compuestos tales como los ácidos arsanílicos que, al combinarse con proteínas, pueden dar origen a los anticuerpos. Es de presumir que cada antígeno natural tenga en su molécula una región específica que actúe como un hapteno. Según esta teoría, un germen o virus capaz de servir de vacuna es aquel cuya estructura se ha modificado suficientemente para reducir su capacidad de dañar las células, pero que aún continúa teniendo intacto su grupo de haptenos, de tal forma que puede originar la formación de un anticuerpo específico.

Sería interesante conocer la naturaleza química de los haptenos naturales. Si llegara a determinarse, quizá fuera posible utilizar un hapteno, tal vez en combinación con algunas proteínas inofensivas, en calidad de vacuna que originara anticuerpos para un antígeno específico. Con ello se evitaría la necesidad de recurrir a toxinas o virus atenuados, que siempre acarrean un cierto pequeño riesgo.

Aún no se ha determinado la forma en que un antígeno hace surgir un anticuerpo. Ehrlich creía que el organismo contiene normalmente una pequeña reserva de todos los anticuerpos que pueda necesitar y que cuando un antígeno invasor reacciona con el anticuerpo apropiado, estimula al organismo a producir una reserva extra de ese anticuerpo determinado. Algunos inmunólogos aún siguen adhiriéndose a esta teoría o a su modificación, y, sin embargo, es altamente improbable que el cuerpo esté preparado con anticuerpos específicos para todos los antígenos posibles, incluyendo aquellas sustancias no naturales, como los ácidos arsanílicos.

La otra alternativa sugerida es la de que el organismo posee alguna molécula proteínica generalizada, capaz de amoldarse a cualquier antígeno. Entonces el antígeno actúa como patrón para modelar el anticuerpo específico formado por reacción a él. Pauling expuso dicha teoría en 1940. Sugirió que los anticuerpos específicos son variantes de la misma molécula básica, plegada simplemente de distintas formas. En otras palabras, se moldea el anticuerpo para que se adapte a su antígeno como un guante se adapta a la mano.

Sin embargo, en 1969, los progresos en el análisis de las proteínas permitieron que un equipo dirigido por Gerald M. Edelman determinara la estructura aminoácida de un anticuerpo típico compuesto por más de mil aminoácidos. Sin duda, esto allanará el camino para descubrir de qué modo trabajan esas moléculas, algo que aún no conocemos bien.

En cierta forma, la propia especificidad de los anticuerpos constituye una desventaja. Supongamos que un virus se transforma de tal modo que su proteína adquiere una estructura ligeramente diferente. A menudo, el antiguo anticuerpo del virus no se adaptará a la nueva estructura. Y resulta que la inmunidad contra una cepa de virus no constituye una salvaguardia contra otra cepa. El virus de la gripe y del catarro común muestran particular propensión a pequeñas transformaciones, y ésta es una de las razones de que nos veamos atormentados por frecuentes recaídas de dichas enfermedades. En particular, la gripe desarrolla ocasionalmente una variación de extraordinaria virulencia, capaz de barrer a un mundo sorprendido y no inmunizado. Ésto fue lo que ocurrió en 1918 y con resultados mucho menos fatales con la «gripe asiática» pandémica de 1957.

Un ejemplo aún más fastidioso de la extraordinaria eficiencia del organismo para formar anticuerpos es su tendencia a producirlos incluso contra proteínas indefensas que suelen introducirse en el cuerpo. Entonces, el organismo se vuelve «sensitivo» a esas mismas proteínas y puede llegar a reaccionar violentamente ante

cualquier incursión ulterior de esas proteínas inocuas en su origen. La reacción puede adoptar la forma de picazón, lágrimas, mucosidades en la nariz y garganta, asma y así sucesivamente. «Reacciones alérgicas» semejantes pueden provocarlas el polen de ciertas plantas (como el de la fiebre del heno), determinados alimentos, el pelo o caspa de animales, y otras muchas cosas. La reacción alérgica puede llegar a ser lo suficientemente aguda para originar graves incapacidades o incluso la muerte. Por el descubrimiento de ese «shock anafiláctico», el fisiólogo francés Charles Robert Richet obtuvo el premio Nobel de Medicina y Fisiología, en 1913.

En cierto sentido, cada ser humano es más o menos alérgico a todos los demás seres humanos. Un trasplante o un injerto de un individuo a otro no prenderá porque el organismo del receptor considera como una proteína extraña el tejido trasplantado y fabrica contra él anticuerpos. El único injerto de una persona a otra capaz de resultar efectivo es entre dos gemelos idénticos. Como su herencia idéntica les proporciona exactamente las mismas proteínas, pueden intercambiar tejidos e incluso un órgano completo, como, por ejemplo, un riñón.

El primer trasplante de riñón efectuado con éxito tuvo lugar en Boston (en diciembre de 1954) entre dos hermanos gemelos. El receptor murió en 1962, a los treinta años de edad, por una coronariopatía. Desde entonces, centenares de individuos han vivido durante meses e incluso años con riñones trasplantados de *otros*, y no precisamente hermanos gemelos.

Se han hecho tentativas para trasplantar nuevos órganos, tales como pulmones o hígado, pero lo que verdaderamente captó el interés público fue el trasplante de corazón. Los primeros trasplantes de corazón fueron realizados, con moderado éxito, por el cirujano sudafricano Christiaan Barnard en diciembre de 1967. El afortunado receptor, Philip Blaiberg —un dentista jubilado de Sudáfrica—, vivió durante muchos meses con un corazón ajeno. Después de aquel suceso, los trasplantes de corazón hicieron furor, pero este exagerado optimismo decayó considerablemente a fines de 1969. Pocos receptores disfrutaron de larga vida, pues el rechazo de los tejidos pareció plantear problemas gigantescos, pese a los múltiples intentos para vencer esa resistencia del organismo a aceptar tejidos extraños.

El bacteriólogo australiano Macfarlane Burnet opinó que se podría «inmunizar» el tejido embrionario con respecto a los tejidos extraños, y entonces el animal en libertad toleraría los injertos de esos tejidos. El biólogo británico Peter Medawar demostró la verosimilitud de tal concepto empleando embriones de ratón. Se recompensó a ambos por estos trabajos con el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1960.

En 1962, un inmunólogo franco-australiano, Jacques Francis-Albert-Pierre Miller, que trabajaba en Inglaterra, fue aún más lejos y descubrió el motivo de esa capacidad para laborar con embriones al objeto de permitir la tolerancia en el futuro. Es decir, descubrió que el timo (una glándula cuya utilidad había sido desconocida hasta entonces) era precisamente el tejido capaz de formar anticuerpos. Cuando se extirpaba el timo a un ratón recién nacido, el animal moría tres o cuatro meses después, debido a una incapacidad absoluta para protegerse contra el medio ambiente. Si se permitía que el ratón conservara el timo durante tres semanas, se observaba que ese plazo era suficiente para el desarrollo de células productoras de anticuerpos y entonces se podía extirpar la glándula sin riesgo alguno. Aquellos embriones en los que el timo no ha realizado todavía su labor, pueden recibir un tratamiento adecuado que les «enseñe» a tolerar los tejidos extraños. Tal vez sea posible algún día mejorar, mediante el timo, la tolerancia de los tejidos cuando se estime conveniente y quizás incluso en los adultos.

No obstante, aún cuando se supere el problema del rechazo, persistirán todavía otros problemas muy serios. Al fin y al cabo, cada persona que se beneficie de un órgano vivo deberá recibirlo de alguien dispuesto a donarlo, y entonces surge esta pregunta: ¿Cuándo es posible afirmar que el donante potencial está «suficientemente muerto» para ceder sus órganos? A este respecto quizá fuera preferible preparar órganos mecánicos que no implicaran el rechazo del tejido ni las espinosas disyuntivas éticas.

Los riñones artificiales probaron su utilidad práctica por los años cuarenta, y hoy día los pacientes con insuficiencia en su funcionalismo renal natural pueden visitar el hospital una o dos veces por semana, para purificar su sangre. Es una vida de sacrificio para quienes tienen la suerte de recibir tal servicio, pero siempre es preferible a la muerte.

En la década de 1940, los investigadores descubrieron que las reacciones alérgicas son producidas por la liberación de pequeñas cantidades de una sustancia llamada «histamina» en el torrente sanguíneo. Esto condujo a la búsqueda, con éxito, de «antihistaminas» neutralizantes, capaces de aliviar los síntomas alérgicos, aunque sin curar, desde luego, la alergia. La primera antihistamina eficaz la obtuvo en 1937 en el Instituto Pasteur de París, un químico suizo, Daniel Bovet, quien, por ésta y ulteriores investigaciones en Quimioterapia, fue galardonado con el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1957.

Al observar que la secreción nasal y otros síntomas alérgicos eran muy semejantes a los del catarro común, algunos laboratorios farmacéuticos decidieron que lo que era eficaz para unos lo sería para el otro, y en 1949 y 1950 inundaron el mercado de tabletas antihistamínicas. (Resultó que dichas tabletas aliviaban poco o nada los resfriados, por lo que su popularidad disminuyó.) En 1937, gracias a las técnicas electroforéticas para aislar proteínas, los biólogos descubrieron, finalmente, el enclave físico de los anticuerpos en la sangre. Éstos se encontraban localizados en la fracción sanguínea denominada «gammaglobulina».

Hace tiempo que los médicos tenían conciencia de que algunos niños eran incapaces de formar anticuerpos, por lo cual resultaban presa fácil de la infección. En 1951, algunos médicos del Walter Reed Hospital de Washington realizaron un análisis electroforético del plasma de un niño de ocho años que sufría una septicemia grave («envenenamiento de la sangre») y, asombrados, descubrieron que en la sangre del paciente no había rastro alguno de gammaglobulina. Rápidamente fueron surgiendo otros casos. Los investigadores comprobaron que dicha carencia era debida a un defecto congénito en su metabolismo, que priva al individuo de la capacidad para formar gammaglobulina; a este defecto se le denominó «agammaglobulinemia». Estas personas son incapaces de desarrollar inmunidad frente a las bacterias. Sin embargo, ahora puede mantenérselas con vida gracias a los antibióticos. Pero lo que aún resulta más sorprendente es que *sean* capaces de hacerse inmunes a las infecciones víricas, como el sarampión y la varicela, una vez que han padecido dichas enfermedades. Al parecer, los anticuerpos no constituyen las únicas defensas del organismo contra los virus.

En 1957, un grupo de bacteriólogos británicos, a la cabeza del cual se encontraba Alick Isaacs, demostraron que las células, con el estímulo de una invasión de virus, liberaban una proteína de amplias propiedades antivíricas. No sólo combatía al virus origen de la infección presente, sino también a otros. Esta proteína, llamada interferón, se produce con mucha mayor rapidez que los anticuerpos y tal vez explique las defensas antivirus de quienes padecen la agammaglobulinemia. Aparentemente, su producción es estimulada por la presencia de ARN en la variedad hallada en los virus. El interferón parece dirigir la síntesis de un ARN mensajero que produce una proteína antivírica que inhibe la producción de proteína vírica, aunque no de otras formas de proteínas. El interferón parece ser tan potente como los antibióticos y no activa ninguna resistencia. Sin embargo, es específico de las especies. Sólo pueden aplicarse interferones de seres humanos, o de otros primates al organismo humano.

Cáncer

A medida que disminuye el peligro de las enfermedades infecciosas, aumenta la incidencia de otros tipos de enfermedades. Mucha gente, que hace un siglo hubiera muerto joven de tuberculosis o difteria, de pulmonía o tifus, hoy día viven el tiempo suficiente para morir de dolencias cardíacas o de cáncer. Ésa es la razón de que las enfermedades cardíacas y el cáncer se hayan convertido en el asesino número uno y dos, respectivamente, del mundo occidental. De hecho, el cáncer ha

sucedido a la peste y a la viruela como plaga que azota al hombre. Es una espada que pende sobre todos nosotros, dispuesta a caer sobre cualquiera sin previo aviso ni misericordia. Todos los años mueren de cáncer trescientos mil americanos, mientras cada semana se registran diez mil nuevos casos. El riesgo de incidencia era del 50 % en 1900.

En realidad, el cáncer constituye un grupo de muchas enfermedades (se conocen alrededor de trescientos tipos), que afectan de distintas formas a diversas partes del organismo. Pero la perturbación primaria consiste siempre en lo mismo: desorganización y crecimiento incontrolado de los tejidos afectados. El nombre cáncer (palabra latina que significa «cangrejo») procede del hecho de que Hipócrates y Galeno suponían que la enfermedad hacía estragos a través de las venas enfermas como las extendidas y crispadas patas de un cangrejo. «Tumor» (del latín «crecimiento») no es en forma alguna sinónimo de cáncer; responde tanto a crecimientos inofensivos, como verrugas y lunares («tumores benignos»), como al cáncer («tumores malignos»). Los cánceres se designan en forma muy variada de acuerdo con el tejido al que afectan. A los cánceres de la piel o del epitelio intestinal (los malignos más comunes) se les llama «carcinomas» (de un vocablo griego que significa «cangrejo»); a los cánceres del tejido conjuntivo se les denomina «sarcomas»; a los del hígado, «hepatoma»; a los de las glándulas en general, «adenomas»; a los de los leucocitos, «leucemia», y así sucesivamente.

Rudolf Virchow, de Alemania, el primero en estudiar los tejidos cancerosos con un microscopio, creía que el cáncer lo causaba la irritación y colapso del ambiente exterior. Es una creencia natural, porque son precisamente aquellas partes del cuerpo más expuestas al mundo exterior las que más sufren de cáncer. Pero al popularizarse la teoría del germen de las enfermedades, los patólogos empezaron a buscar algún microbio que causara el cáncer. Virchow, tenaz adversario de la teoría del germen de las enfermedades, se aferró a la de la irritación. (Abandonó la Patología por la Arqueología y la Política cuando se hizo evidente que iba a imperar la teoría del germen de las enfermedades. En la Historia, pocos científicos se han hundido con el barco de sus creencias erróneas de forma tan absolutamente drástica.) Si Virchow se mostró tenaz por un motivo equivocado, pudo haberlo sido por la verdadera razón. Han ido presentándose pruebas crecientes de que algunos ambientes son particularmente inductores del cáncer. Durante el siglo XVIII se descubrió que los deshollinadores eran más propensos al cáncer de escroto que otras personas. Después de descubrirse los tintes de alquitrán de hulla, aparecieron unas incidencias superiores al promedio normal entre los trabajadores de las industrias de tintes, a causa de cáncer de piel y de vejiga. Parecía existir algún elemento en el hollín y en los tintes de anilina capaz de producir cáncer. Y entonces, en 1915, dos científicos japoneses. K. Yamagiwa y K. Ichikawa, descubrieron que cierta partícula del alquitrán de hulla podía producir cáncer en conejos si se les aplicaba en las orejas durante largos períodos.

En el año 1930, dos químicos británicos indujeron cáncer en animales con un producto químico sintético llamado «dibenzantraceno» (un hidrocarburo con una molécula formada por cinco cadenas de benceno). Esto no aparecía en el alquitrán de hulla, pero tres años después se descubrió que el «benzopireno» (que contenía también cinco cadenas benceno, pero en diferente orden), elemento químico que *sí* que se da en el alquitrán de hulla, podía producir cáncer.

Hasta el momento han sido identificados un buen número de «carcinógenos» (productores de cáncer). Muchos son hidrocarburos formados por numerosas cadenas de benceno, como los dos primeros descubiertos. Algunos son moléculas relacionadas con los tintes de anilina. De hecho, una de las principales preocupaciones en el uso de colorantes artificiales en los alimentos es la posibilidad de que a la larga tales colorantes puedan ser carcinógenos.

Muchos biólogos creen que durante los últimos dos o tres siglos el hombre ha introducido nuevos factores productores de cáncer en su ambiente. Existe el uso creciente del carbón, el quemar gasolina

a gran escala, especialmente gasolina en motores de explosión, la creciente utilización de productos químicos sintéticos en los alimentos, los cosméticos y así sucesivamente. Como es natural, el aspecto más dramático lo ofrecen los cigarrillos que, al menos según las estadísticas, parecen ir acompañados de un índice relativamente alto de incidencia de cáncer de pulmón.

Un factor ambiental sobre el que no existe la menor duda de su carácter carcinogénico lo constituye la radiación energética, y desde 1895, el hombre se ha visto expuesto en forma creciente a tales radiaciones.

El 5 de noviembre de 1895 el físico alemán Wilhelm Konrad Roentgen realizó un experimento para estudiar la luminiscencia producida por rayos catódicos. Para mejor observar el efecto, oscureció una habitación. Su tubo de rayos catódicos se encontraba encerrado en una caja negra de cartón. Al hacer funcionar el tubo de rayos catódicos, quedó sobresaltado al distinguir un ramalazo de luz procedente de alguna parte del otro lado de la habitación. El fogonazo procedía de una hoja de papel recubierta con platino-cianuro de bario, elemento químico luminiscente. ¿Era posible que la radiación procedente de la caja cerrada la hubiese hecho brillar? Roentgen cerró su tubo de rayos catódicos y el destello desapareció. Volvió a abrirlo y el destello reapareció. Se llevó el papel a la habitación contigua y aún seguía brillando. Era evidente que el tubo de rayos catódicos producía cierta forma de radiación capaz de atravesar el cartón y las paredes.

Roentgen, que no tenía idea del tipo de radiación de que podía tratarse, lo denominó sencillamente «rayos X» Otros científicos trataron de cambiar la denominación por la de «rayos roentgen», pero su pronunciación resultaba tan difícil para quien no fuera alemán, que se mantuvo la de «rayos X». (Hoy día sabemos que los electrones acelerados que forman los rayos catódicos pierden gran parte de su celeridad al tropezar con una barrera metálica. La energía cinética perdida se convierte en radiación a la que se denomina *Bremsstrahlung*, voz alemana que significa «radiación frenada». Los rayos X son un ejemplo de dicha radiación.) Los rayos X revolucionaron la Física. Captaron la imaginación de los físicos, iniciaron un alud de experimentos, desarrollados en el curso de los primeros meses que siguieran al descubrimiento de la radiactividad y abrieron el mundo interior del átomo. Al iniciarse en 1901 el galardón de los premios Nobel, Roentgen fue el primero en recibir el premio de Física.

La fuerte radiación X inició también algo más: la exposición de los seres humanos a intensidades de radiaciones energéticas tales como el hombre jamás experimentara antes. A los cuatro días de haber llegado a Estados Unidos la noticia del descubrimiento de Roentgen, se recurría a los rayos X para localizar una bala en la pierna de un paciente. Constituían un medio maravilloso para la exploración del interior del cuerpo humano. Los rayos X atraviesan fácilmente los tejidos blandos (constituidos principalmente por elementos de peso atómico bajo) y tienden a detenerse ante elementos de un peso atómico más elevado, como son los que constituyen los huesos (compuestos en su mayor parte por fósforo y calcio). Sobre una placa fotográfica colocada detrás del cuerpo, los huesos aparecen de un blanco nebuloso en contraste con las zonas negras donde los rayos X atraviesan con mayor intensidad, por ser mucho menor su absorción por los tejidos blandos. Una bala de plomo aparece de un blanco puro; detiene los rayos X en forma tajante.

Es evidente la utilidad de los rayos X para descubrir fracturas de huesos, articulaciones calcificadas, caries dentarias, objetos extraños en el cuerpo y otros muchos usos. Pero también resulta fácil hacer destacar los tejidos blandos mediante la introducción de la sal insoluble de un elemento pesado. Al tragar sulfato de bario se harán visibles el estómago o los intestinos. Un compuesto de yodo inyectado en las venas se dirigirá a los riñones y al uréter, haciendo destacarse ambos órganos, ya que el yodo posee un peso atómico elevado y, por tanto, se vuelve opaco con los rayos X.

Antes incluso del descubrimiento de los rayos X, un médico danés, Niels Ryberg Finsen, observó que las radiaciones de alta energía eran capaces de aniquilar microorganismos; utilizaba la luz ultravioleta para destruir las bacterias causantes del *Lupus*

vulgaris, una enfermedad de la piel. (Por tal motivo, recibió, en 1903, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.) Los rayos X resultaron ser aún más mortíferos. Eran capaces de matar el hongo de la tiña. Podían dañar o destruir las células humanas, llegando a ser utilizados para matar las células cancerosas fuera del alcance del bisturí del cirujano.

Pero también llegó a descubrirse, por amargas experiencias, que las radiaciones de alta energía podían *causar* el cáncer. Por lo menos un centenar de las primeras personas que manipularon con los rayos X y materiales radiactivos murieron de cáncer, produciéndose la primera muerte en 1902. De hecho, tanto Marie Curie como su hija Irene Joliot-Curie murieron de leucemia y es fácil suponer que la radiación contribuyó en ambos casos. En 1928, un investigador británico, G. W. M. Findlay, descubrió que incluso la radiación ultravioleta era lo suficientemente energética para producir el cáncer de piel en los ratones.

Resulta bastante razonable sospechar que la creciente exposición del hombre a la radiación energética (en forma de tratamiento médico por rayos X y así sucesivamente) pueda ser responsable de cierto porcentaje en el incremento de la incidencia de cáncer, y el futuro dirá si la acumulación en nuestros huesos de huellas del estroncio 90 procedente de la lluvia radiactiva aumentará la incidencia del cáncer óseo y de la leucemia.

¿Qué pueden tener en común los diversos carcinógenos, productos químicos, radiación y otros? Es razonable suponer que todos ellos son capaces de producir mutaciones genéticas y que el cáncer acaso sea el resultado de mutaciones en las células del cuerpo humano.

Supongamos que algún gen resulta modificado en forma tal que ya no pueda producir una enzima clave necesaria para el proceso que controla el crecimiento de las células. Al dividirse una célula con ese gen defectuoso, transmitirá el defecto. Al no funcionar el mecanismo de control, puede continuar en forma indefinida la ulterior división de esas células, sin considerar las necesidades del organismo en su conjunto o ni siquiera las necesidades de los tejidos a los que afecta (por ejemplo, la especialización de células en un órgano). El tejido queda desorganizado. Se produce, por así decirlo, un caso de anarquía en el organismo.

Ha quedado bien establecido que la radiación energética puede producir mutaciones. ¿Y qué decir de los carcinógenos químicos? También ha quedado demostrado que los productos químicos producen mutaciones. Buen ejemplo de ello lo constituyen las «mostazas nitrogenadas ».

Esos compuestos, como el «gas mostaza» de la Primera Guerra Mundial, producen quemaduras y ampollas en la piel semejantes a las causadas por los rayos X. También pueden dañar los cromosomas y aumentar el índice de mutaciones. Además se ha descubierto que cierto número de otros productos químicos imitan, de la misma forma, las radiaciones energéticas.

A los productos químicos capaces de inducir mutaciones se les denomina «mutágenos». No todos los mutágenos han demostrado ser carcinógenos, ni todos los carcinógenos han resultado ser mutágenos. Pero existen suficientes casos de compuestos, tanto carcinogénicos como mutagénicos, capaces de hacer sospechar que la coincidencia no es accidental.

Entretanto no se ha desvanecido, ni mucho menos, la idea de que los microorganismos pueden tener algo que ver con el cáncer. Con el descubrimiento de los virus ha cobrado nueva vida esta sugerencia de la era de Pasteur. En 1903, el bacteriólogo francés Amédée Borrel sugirió que el cáncer quizá fuera una enfermedad por virus, y en 1908, dos daneses, Wilhelm Ellerman y Olaf Bang, demostraron que la leucemia de las aves era causada en realidad por un virus. No obstante, por entonces aún no se reconocía la leucemia como una forma de cáncer, y el problema quedó en suspenso. Sin embargo, en 1909, el médico americano Francis Peyton Rous cultivó un tumor de pollo y, después de filtrarlo, inyectó el filtrado claro en otros pollos. Algunos de ellos desarrollaron tumores. Cuanto más fino era el filtrado, menos tumores se producían. Ciertamente parecía demostrar que partículas de cierto tipo eran las responsables de la iniciación de tumores, así como que dichas partículas eran del tamaño de los virus.

Los «virus tumorales» han tenido un historial accidentado. En un principio, los tumores que se achacaban a virus resultaron ser uniformemente benignos; por ejemplo, los virus demostraron ser la causa de cosas tales como los papilomas de los conejos (similares a las verrugas). En 1936, John Joseph Bittner, mientras trabajaba en el famoso laboratorio reproductor de ratones, de Bar Harbor, Miane, tropezó con algo más interesante. Maude Slye, del mismo laboratorio, había criado razas de ratones que parecían presentar una resistencia congénita al cáncer y otras, al parecer, propensas a él. Los ratones de ciertas razas muy rara vez desarrollan cáncer; en cambio, los de otras lo contraen casi invariablemente al alcanzar la madurez. Bittner ensayó el experimento de cambiar a las madres de los recién nacidos de forma que éstos se amamantaran de las razas opuestas. Descubrió que cuando los ratoncillos de la raza «resistente al cáncer» mamaban de madres pertenecientes a la raza «propensa al cáncer», por lo general, contraían el cáncer. Por el contrario, aquellos ratoncillos que se suponía propensos al cáncer amamantados por madres resistentes al cáncer no lo desarrollaban. Bittner llegó a la conclusión de que la causa del cáncer, cualquiera que fuese, no era congénita, sino transmitida por la leche de la madre. Lo denominó «factor lácteo».

Naturalmente, se sospechó que el factor lácteo de Bittner era un virus. Por último, el bioquímico Samuel Graff, de la Universidad de Columbia, identificó a dicho factor como una partícula que contenía ácidos nucleicos. Se han descubierto otros virus de tumor causantes de ciertos tipos de tumores en los ratones y de leucemias en animales, todos ellos conteniendo ácidos nucleicos. No se han localizado virus en conexión con cánceres humanos, pero evidentemente la investigación sobre el cáncer humano es limitada.

Ahora empiezan a converger las teorías sobre la mutación y los virus. Acaso lo que puede parecer contradicción entre ambas teorías después de todo no lo sea. Los virus y los genes tienen algo muy importante en común: la clave del comportamiento de ambos reside en sus ácidos nucleicos. En realidad, G. A, di Mayorca y sus colaboradores del Instituto Sloan-Kettering y los Institutos Nacionales de Sanidad, en 1959 aislaron ADN de un virus de tumor de ratón, descubriendo que el ADN podía inducir por sí solo cánceres en los ratones con la misma efectividad con que lo hacía el virus.

De tal forma que la diferencia entre la teoría de la mutación y la del virus reside en si el ácido nucleico causante del cáncer se produce mediante una mutación en un gen dentro de la célula o es introducido por una invasión de virus desde el exterior de la célula. Ambas teorías no son antagónicas; el cáncer puede llegar por los dos caminos.

De todos modos, hasta 1966 la hipótesis vírica no se consideró merecedora del premio Nobel. Por fortuna, Peyton Rous, que había hecho el descubrimiento cincuenta y cinco años antes, aún estaba vivo y pudo compartir en 1966 el Nobel de Medicina y Fisiología. (Vivió hasta 1970, en cuya fecha murió, a los noventa años, mientras se dedicaba aún a efectuar investigaciones.) ¿Qué es lo que se estropea en el mecanismo del metabolismo cuando las células crecen sin limitaciones? Esta pregunta aún no ha sido contestada. Pero existen profundas sospechas respecto a algunas de las hormonas sexuales.

Por una parte, se sabe que las hormonas sexuales estimulan en el organismo un crecimiento rápido y localizado (como, por ejemplo, los senos de una adolescente). Por otra, los tejidos de los órganos sexuales —los senos, el cuello uterino y los ovarios, en la mujer; los testículos y la próstata, en el hombre— muestran una predisposición particular al cáncer. Y la más importante de todas la constituye la prueba química. En 1933, el bioquímico alemán Heinrich Wieland (que obtuviera el premio Nobel de Química, en 1927, por su trabajo sobre los ácidos biliares), logró convertir un ácido biliar en un hidrocarburo complejo llamado «metilcolantreno», poderoso carcinógeno. Ahora bien, el metilcolantreno, al igual que los ácidos biliares, tiene la estructura de cuatro cadenas de un esteroide y resulta que todas las hormonas sexuales son esteroides. ¿Puede una molécula deformada de hormona sexual actuar como carcinógeno? O incluso una hormona

perfectamente formada, ¿puede llevar a ser confundida con un carcinógeno, por así decirlo, por una forma distorsionada de gen en una célula, estimulando así el crecimiento incontrolado? Claro está que tan sólo se trata de especulaciones interesantes.
Y lo que resulta bastante curioso es que un cambio en el suministro de hormonas sexuales contiene a veces el desarrollo canceroso. Por ejemplo, la castración para reducir la producción de hormonas sexuales masculinas, o la administración neutralizadora de hormonas sexuales femeninas, ejerce un efecto paliativo en el cáncer de próstata. Como tratamiento, no puede decirse que merezcan un coro de alabanzas, y el que se recurra a estas manipulaciones indica el grado de desesperación que inspira el cáncer.
El principal sistema de ataque contra el cáncer aún sigue siendo la cirugía. Y sus limitaciones continúan siendo las mismas: a veces, no puede extirparse el cáncer sin matar al paciente; con frecuencia, el bisturí libera trocitos del tejido maligno (ya que el tejido desorganizado del cáncer muestra tendencia a fragmentarse), que entonces son transportados por el torrente sanguíneo a otras partes del organismo, donde arraigan y crecen.
El uso de radiación energética para destruir el cáncer presenta también sus inconvenientes. La radiactividad artificial ha incorporado nuevas armas a las ya tradicionales de los rayos X y el radio. Una de ellas es el cobalto 60, que genera rayos gamma de elevada energía y es mucho menos costoso que el radio; otra es una solución de yodo radiactivo (el «cóctel atómico»), que se concentra en la glándula tiroides, atacando así el cáncer tiroideo. Pero la tolerancia del organismo a las radiaciones es limitada, y existe siempre el peligro de que la radiación inicie más cáncer del que detiene.
Pese a todo, la cirugía y la radiación son los mejores medios de que se dispone hasta ahora, y ambos han salvado, o al menos prolongado, muchas vidas. Y necesariamente serán el principal apoyo del hombre contra el cáncer hasta que los biólogos encuentren lo que están buscando: un «proyectil mágico», que sin lesionar las células normales, luche contra las células cancerosas bien para destruirlas o para detener su desatinada división.
Se está desarrollando una labor muy eficaz a lo largo de dos rutas principales. Una conduce a averiguar todo lo posible acerca de esa división celular. La otra, a especificar con el mayor número posible de pormenores cómo realizan las células su metabolismo con el fin esperanzador de encontrar alguna diferencia decisiva entre las células cancerosas y las normales. Se han encontrado ya algunas diferencias, pero todas ellas bastante insignificantes... por ahora.
Entretanto se está llevando a cabo una magnífica selección de elementos químicos mediante el ensayo y el error. Cada año se ponen a prueba 50.000 nuevos medicamentos. Durante algún tiempo, las mostazas nitrogenadas parecieron ser prometedoras, de acuerdo con la teoría de que ejercían efectos parecidos a la irradiación y podían destruir las células cancerosas. Algunos medicamentos de este tipo parecen representar alguna ayuda contra ciertas clases de cáncer, por lo menos en lo concerniente a la prolongación de la vida, pero evidentemente son tan sólo un remedio paliativo.
Se han depositado más esperanzas en la dirección de los ácidos nucleicos. Debe existir alguna diferencia entre los ácidos nucleicos de las células cancerosas y los de las normales. El objetivo, pues, es encontrar un método para interceptar la acción química de uno y no la de los otros. Por otro lado, tal vez las células cancerosas desorganizadas sean menos eficientes que las células normales en la producción de ácidos nucleicos. Si fuera así, la introducción de unos cuantos gramos de arena en la maquinaria podría truncar las células cancerosas menos eficientes sin perturbar seriamente a las eficaces células normales.
Por ejemplo, una sustancia vital para la producción de ácido nucleico es el ácido fólico. Éste representa un papel primordial en la formación de purinas y pirimidinas, los bloques constitutivos del ácido nucleico. Ahora bien, un compuesto semejante al ácido fólico podría (mediante la inhibición competidora) retardar el proceso lo suficiente para impedir que las células cancerosas

formaran ácido nucleico, permitiendo mientras tanto que las células normales lo produjeran a un ritmo adecuado, y, claro está, las células cancerosas no podrían multiplicarse sin ácido nucleico. De hecho, existen tales «antagonistas acidofólicos». Uno de ellos, denominado «ametopterina», ha demostrado ejercer cierto efecto contra la leucemia.

Pero hay todavía un ataque más directo. ¿Por qué no inyectar sustitutivos competidores de las propias purinas y pirimidinas? El candidato más prometedor es la «G-mercaptopurina». Este compuesto es como la adenina, pero con una diferencia: posee un grupo —SH en lugar del —NH_2 de la adenina.

No se debe desestimar el posible tratamiento de una sola dolencia en el grupo de enfermedades cancerosas: Las células malignas de ciertos tipos de leucemia requieren una fuente externa de la sustancia aspargina que algunas células sanas pueden fabricar por sí solas. El tratamiento con la enzima aspargina, que cataliza la desintegración de la aspargina, reduce sus reservas en el organismo y da muerte a las células malignas, mientras que las normales logran sobrevivir.

La investigación decidida y universalizada acerca del cáncer es incisiva y estimable en comparación con otras investigaciones biológicas, y su financiación merece el calificativo de espléndida. El tratamiento ha alcanzado un punto en que una de cada tres víctimas sobreviven y hacen una vida normal durante largo tiempo. Pero la curación total no se descubrirá fácilmente, pues el secreto del cáncer es tan sutil como el secreto de la vida misma.

XIV. EL CUERPO

Alimentos

El primer adelanto importante en la ciencia médica fue, quizás, el descubrimiento de que una buena salud exigía una dieta sencilla y equilibrada. Los filósofos griegos recomendaban moderación en la comida y en la bebida, no sólo por razones filosóficas, también porque los que seguían esta regla se sentían mejor y vivían más años. Esto era un buen comienzo, pero con el tiempo los biólogos comprendieron que la simple moderación no era suficiente.

Aunque se tenga la suerte de poder evitar comer demasiado poco y el sentido común suficiente para no comer demasiado, no se conseguirá gran cosa si la dieta es pobre en determinados elementos esenciales, como ocurre realmente en gran número de personas en algunos lugares del planeta.

En cuanto a sus necesidades dietéticas, el cuerpo humano está más bien especializado. Una planta puede vivir sólo a base de anhídrido carbónico, agua y ciertos iones orgánicos. Algunos microorganismos pueden, igualmente, arreglárselas sin alimento orgánico alguno; por ello, se les denomina «autotróficos» («autoalimentados»), lo cual significa que pueden crecer en ambientes en los que no existe otro ser viviente. La *Neurospora* del pan molturado es ya un poco más complicada: además de las sustancias inorgánicas, necesita azúcar y la vitamina biotina, y, a medida que las formas de vida se van haciendo más y más complejas, parecen depender cada vez en mayor grado de su dieta para el suministro del material orgánico necesario en la formación del tejido vivo. El motivo de ello es, simplemente, que han perdido algunas de las enzimas que poseen los organismos más primitivos. Una planta verde dispone de un suministro completo de enzimas para formar, a partir de materias inorgánicas, todos los aminoácidos, proteínas, grasas e hidratos de carbono que necesita. La *Neurospora* posee todas las enzimas, excepto las necesarias para formar azúcar y biotina. Cuando llegamos al hombre, encontramos que carece de las enzimas necesarias para producir muchos de los aminoácidos, vitaminas y otros productos necesarios, y que debe obtenerlos ya elaborados, a través de los alimentos.

Esto puede parecer una especie de degeneración, una creciente dependencia del medio ambiente, que coloca al organismo humano en una situación desventajosa. Pero no es así. Si el medio ambiente proporciona los materiales de construcción, ¿para qué cargar con la complicada maquinaria enzimática que se necesita para fabricarlos? Ahorrándose esta maquinaria, la célula puede

emplear su energía y espacio para fines más delicados y especializados.
Fue el médico inglés William Prout (el mismo Prout que se adelantó un siglo a su época, al afirmar que todos los elementos estaban formados a partir del hidrógeno) quien primeramente sugirió que los alimentos orgánicos podían ser divididos en tres tipos de sustancias, más tarde denominados hidratos de carbono, grasas y proteínas.
Los químicos y biólogos del siglo XIX, sobre todo el alemán Justus von Liebig, descubrieron gradualmente las propiedades nutritivas de estos alimentos. Averiguaron que las proteínas son las más esenciales y que el organismo puede sobrevivir solo con éstas. El cuerpo no puede producir proteínas a partir de los hidratos de carbono y las grasas, porque estas sustancias no tienen nitrógeno, pero puede formar los hidratos de carbono y las grasas necesarias partiendo de materias suministradas por las proteínas. No obstante, puesto que la proteína es relativamente escasa en el medio ambiente, sería un despilfarro vivir a base de una dieta formada únicamente por proteínas —algo así como alimentar el fuego con los muebles de la casa, cuando no se dispone de troncos para ello—.
En circunstancias favorables, las necesidades diarias de proteínas del cuerpo humano, dicho sea de paso, son sorprendentemente bajas. El Departamento de Alimentos y Nutrición de la Junta Nacional de Investigación, en su cuadro de recomendaciones de 1958, sugería que la cantidad mínima para un adulto era la de un gramo de proteínas por kilogramo de peso corporal al día, lo que supone un poco más de 56,5 g para el adulto medio. Aproximadamente dos litros de leche pueden aportar esta cantidad. Los niños y las mujeres embarazadas, o en período de lactación, necesitan una mayor cantidad de proteínas.
Desde luego, gran parte depende de las proteínas que se elijan. Los científicos del siglo XIX trataron de averiguar si, en épocas de hambre, la población podría vivir alimentándose únicamente de gelatina —un material proteínico que se obtiene calentando huesos, tendones y demás partes, en otro caso no comestibles, de los animales—. Pero el fisiólogo francés Francois Magendie demostró que, cuando la gelatina era su única fuente de proteínas, los perros perdían peso y morían. Esto no significa que sea un error administrar gelatina como alimento, sino simplemente que no se aporta todo el material energético necesario, cuando ésta es la única proteína contenida en la dieta. La clave de la utilidad de una proteína radica en la eficacia con que el organismo puede emplear el nitrógeno que suministra. En 1854, los peritos agrícolas británicos John Bennet Lawes y Joseph Henry Gilbert alimentaron un grupo de cerdos con proteínas administradas en dos formas —lentejas y cebada—. Descubrieron que los cerdos retenían mucho más nitrógeno con la dieta de cebada que con la de lentejas, estos fueron los primeros experimentos del «balance de nitrógeno».
Un organismo en crecimiento acumula gradualmente nitrógeno a partir de los alimentos que ingiere («balance positivo de nitrógeno»). Si se está muriendo de hambre o sufre una enfermedad debilitante, y la gelatina es su única fuente de proteínas, el cuerpo continúa, desde el punto de vista del equilibrio del nitrógeno, muriendo de hambre o consumiéndose (situación que se denomina «balance negativo de nitrógeno»). Sigue perdiendo más nitrógeno del que asimila, independientemente de la cantidad de gelatina con que se le alimenta.
¿Por qué sucede así? Los químicos del siglo XIX descubrieron, finalmente, que la gelatina es una proteína particularmente simple. Carece de triptófano y de otros aminoácidos que existen en la mayor parte de las proteínas. Sin estos materiales de construcción orgánicos, el cuerpo no puede elaborar las proteínas que necesita. Por tanto, a menos que tenga en su alimentación otras proteínas, los aminoácidos que se encuentran en la gelatina son inútiles y deben ser excretados. Es como si los constructores se encontrasen con grandes cantidades de tablas de madera, pero no tuviesen clavos. No sólo les resultaría imposible construir la casa, sino que los tablones realmente estorbarían y, por último, tendrían que deshacerse de ellos. En la década de 1890, se realizaron intentos para convertir la gelatina en un componente dietético más eficiente, añadiéndole algunos de los aminoácidos en los que era

deficitaria, pero sin éxito. Se han obtenido mejores resultados con proteínas no tan rigurosamente limitadas en su composición como la gelatina.

En 1906, los bioquímicos ingleses Frederick Gowland Hopkins y E. G. Willcock alimentaron a un ratón con una dieta en la que la única proteína era la ceína, que se encuentra en el maíz. Sabían que esta proteína contenía poca cantidad de triptófano. El ratón murió al cabo de unos catorce días. Los investigadores trataron entonces de alimentar a otro ratón con ceína, añadiéndole triptófano. Esta vez, el ratón sobrevivió el doble de tiempo. Era la primera prueba sólida de que los aminoácidos, más que las proteínas, debían de ser los componentes esenciales de la dieta. (Aunque el ratón seguía muriendo prematuramente, esto quizás era debido, sobre todo, a la falta de ciertas vitaminas, no conocidas en aquellos años.) En la década de 1930, William Cumming Rose, un especialista norteamericano en nutrición, resolvió finalmente el problema de los aminoácidos. En aquella época, se conocían ya la mayor parte de las vitaminas, de modo que pudo suministrar a los ratones las que necesitaban y concentrarse en los aminoácidos. Rose administró como alimento a las ratas una mezcla de aminoácidos, en lugar de proteínas. Las ratas no vivieron demasiado tiempo con esta dieta. Pero cuando los alimentó con una proteína de la leche, denominada caseína, consiguieron sobrevivir. En apariencia, había algo en la caseína —probablemente algún aminoácido todavía no descubierto— que no se hallaba presente en la mezcla de aminoácidos que había empleado. Rose descompuso la caseína y trató de añadir algunos fragmentos moleculares de ésta a su mezcla de aminoácidos. De este modo consiguió hallar el aminoácido denominado «treinina», el último de los aminoácidos principales que quedaba por descubrir. Cuando añadió la treinina extraída de la caseína a su mezcla de aminoácidos, las ratas crecieron satisfactoriamente sin necesidad de ninguna proteína íntegra en su dieta.

Rose procedió a efectuar diversas pruebas, suprimiendo cada vez uno de los aminoácidos de la dieta. Con este método, identificó finalmente diez aminoácidos como elementos indispensables en la dieta de la rata: lisina, triptófano, histidina, fenilalanina, leucina, isoleucina, treonina, metionina, valina y arginina. Si se le suministraban cantidades suficientes de estos elementos, la rata podía manufacturar el resto de los que necesitaba, como la glicina, la prolina, el ácido aspártico, la alanina, etc.

En la década de 1940, Rose dirigió su atención hacia las necesidades del hombre en cuanto a aminoácidos. Logró persuadir a algunos estudiantes graduados para que se sometiesen a dietas controladas, en las que la única fuente de nitrógeno era una mezcla de aminoácidos. En 1949, pudo ya anunciar que el hombre adulto sólo necesitaba ocho aminoácidos en su dieta: fenilalanina, leucina, isoleucina, metionina, valina, lisina, triptófano y treonina. Puesto que la arginina y la histidina, indispensables en la rata, no lo son en el hombre, podría llegarse a la conclusión de que el hombre era menos especializado que la rata, o, realmente, que cualquiera de los animales con los que se ha experimentado en detalle.

Potencialmente, una persona podría vivir con solo los ocho aminoácidos dietéticos esenciales; suministrándole la cantidad necesaria de éstos, no sólo podría producir los restantes aminoácidos que necesita, sino también los hidratos de carbono y las grasas. De todos modos, una dieta constituida exclusivamente por aminoácidos sería demasiado cara, sin contar con su insipidez y monotonía. Pero resulta considerablemente útil saber cuáles son nuestras necesidades en aminoácidos, de modo que podamos reforzar las proteínas naturales cuando es necesario para conseguir una máxima eficacia en la absorción y utilización del nitrógeno.

Vitaminas

Los caprichos alimenticios y las supersticiones, desgraciadamente, siguen engañando a demasiada gente —y enriqueciendo a demasiados vendedores de «curalotodo», incluso en estos tiempos ilustrados. En realidad, el que nuestros tiempos sean más ilustrados quizá sea la causa de que puedan permitirse tales caprichos alimentarios. A través de la mayor parte de la historia

del hombre, la comida de éste ha consistido en cualquier cosa que se produjese a su alrededor, casi siempre en escasa cantidad. Se trataba de comer lo que había, o perecer de hambre; nadie podía mostrar remilgos, y, sin una actitud remilgada, no pueden existir caprichos alimentarios.

El transporte moderno ha permitido enviar los alimentos de una parte a otra de la Tierra, particularmente desde que ha surgido el empleo de la refrigeración a gran escala. Esto ha reducido la amenaza de hambre, que en otros tiempos tenía un carácter inevitablemente local, con regiones en que abundaba la comida que no podía ser trasladada de la región a aquellas otras en que se padecía hambre.

El almacenamiento en el propio hogar de los diversos alimentos fue posible tan pronto como el hombre aprendió a conservar los alimentos, salándolos, secándolos, aumentando su contenido en azúcar, fermentándolos, etc. Se pudo mantenerlos en un estado muy parecido al natural, cuando se desarrollaron métodos para almacenar la comida cocida era el vacío (la cocción mata los microorganismos, y el vacío evita que nazcan y se reproduzcan otros nuevos). El almacenamiento en el vacío fue puesto en práctica por primera vez por un jefe de cocina francés, François Appert, quien desarrolló la técnica impulsado por un premio ofrecido por Napoleón a quien le ofreciera un medio para conservar los alimentos de sus ejércitos.

Appert empleó jarros de cristal; pero actualmente se emplean para este propósito latas de acero estañado (inadecuadamente llamadas «hojalatas» o sólo «latas»). Desde la Segunda Guerra Mundial, se han hecho cada día más populares los alimentos congelados, y el número creciente de frigoríficos en los hogares ha permitido disponer cada vez más de gran variedad de alimentos frescos. A medida que ha ido aumentando la disponibilidad del número de alimentos, se ha ido incrementando también la posibilidad de los caprichos alimentarios.

Esto no quiere decir que no sea útil una sabia elección de las comidas. Hay determinados casos en los que alimentos específicos pueden curar definitivamente una determinada enfermedad.

Asimismo, hay muchas «enfermedades carenciales», enfermedades producidas por la carencia en la dieta de alguna sustancia indispensable para el funcionamiento químico del cuerpo. Estas anomalías surgen invariablemente cuando se priva al hombre de una dieta normal, equilibrada —es decir, aquella que contiene una amplia variedad de alimentos—.

Realmente, el valor de una dieta equilibrada y variada fue ya comprendido por muchos médicos del siglo XIX, e incluso antes, cuando la química de la alimentación seguía siendo un misterio. Un famoso ejemplo es el de Florence Nightingale, la heroica enfermera inglesa de la guerra de Crimea, quien abrió el camino para una alimentación adecuada de los soldados, así como para su tratamiento médico razonable. Sin embargo, la «dietética» (el estudio sistemático de la dieta) no hizo su aparición hasta finales de siglo, gracias al descubrimiento de sustancias presentes en forma de trazas en la alimentación, que son esenciales para la vida.

El mundo antiguo estaba muy familiarizado con el escorbuto, una enfermedad en la que los capilares se vuelven cada vez más frágiles, las encías sangran y los dientes se caen, las heridas cicatrizan con mucha dificultad, si es que lo, hacen, y el enfermo se debilita hasta que finalmente muere. Aparecía con particular frecuencia en las ciudades asediadas y en los largos viajes transoceánicos. (La tripulación de Magallanes padeció más penalidades a causa del escorbuto que debido a la desnutrición general.) En los largos viajes, los barcos, que carecían de refrigeración, tenían que llevar alimentos que no se corrompieran, lo que significaba abundancia de cerdo salado y galleta. Sin embargo, durante muchos siglos los médicos no consiguieron descubrir una relación entre el escorbuto y la dieta alimentaria.

En 1536, mientras el explorador francés Jacques Cartier estaba invernando en Canadá, 110 de sus hombres fueron afectados por el escorbuto. Los indios nativos lo conocían y sugirieron un remedio a esta enfermedad: beber agua en la que se hubiesen remojado agujas de pino. En su desesperación, los hombres de

Cartier siguieron aquel consejo que parecía infantil. El remedio les curó el escorbuto.
Dos siglos más tarde, en 1747, el médico escocés James Lind tomó nota de diversos incidentes de este tipo, y se dedicó a experimentar con la fruta fresca y las verduras, como remedio. Probando su tratamiento en marineros enfermos de escorbuto, descubrió que las naranjas y los limones conseguían en ellos rápidas mejorías. El capitán Cook, en su viaje de exploración a través del Pacífico, entre 1772 y 1775, mantuvo a su tripulación libre del escorbuto imponiendo una dieta regular de col ácida. Sin embargo, hasta 1795 los oficiales de Estado Mayor de la Marina Británica no quedaron lo bastante impresionados por los experimentos de Lind (y por el hecho de que una flotilla afectada por el escorbuto podía perder un combate naval sin apenas luchar) para ordenar el suministro de raciones diarias de zumo de lima[13] para los marineros británicos. (Desde entonces se les llama «limeys», y la zona del Támesis, en Londres, donde se almacenaban las canastas de limas, se sigue llamando «Limehouse».) Gracias al zumo de lima, el escorbuto desapareció de la Marina británica.
Un siglo más tarde, en 1891, el almirante Takaki, de la Marina japonesa, de forma similar, introdujo una dieta variada para romper la monotonía de las raciones de arroz de sus barcos. El resultado fue "la desaparición, en la Marina japonesa, de la enfermedad conocida con el nombre de «beriberi».
A pesar de las ocasionales victorias dietéticas de este tipo (que nadie podía explicar), los biólogos del siglo XIX se negaron a creer que una enfermedad pudiera curarse mediante una dieta, especialmente tras la aceptación de la teoría de los gérmenes de Pasteur. No obstante, en 1896, un médico holandés llamado Christiaan Eijkman les convenció, casi en contra de su voluntad.

[13] *Lima:* Una especie de limón más pequeño y redondo que los demás. Hay dos variedades: la agria y la dulce. (N. del T.)

Eijkman fue enviado a las Indias Orientales holandesas para investigar el beriberi, endémico en aquellas regiones (y que, incluso hoy día, conociendo la medicina su causa y cómo curarlo, sigue matando unas 100.000 personas al año). Takaki había conseguido detener la evolución de los enfermos de beriberi, adoptando medidas dietéticas; pero, aparentemente, Occidente no dio importancia a lo que podría considerarse únicamente como la doctrina mística oriental.
Suponiendo que el beriberi era una enfermedad provocada por gérmenes, Eijkman utilizó algunos pollos como animales de experimentación para descubrir el germen en ellos. Un afortunado accidente vino a trastornar sus planes. Sin previo aviso, la mayor parte de sus pollos contrajeron una extraña parálisis a consecuencia de la cual algunos murieron; al cabo de cuatro meses, los supervivientes recobraron la salud. Eijkman, extrañado de no poder encontrar germen alguno responsable de la enfermedad, se decidió finalmente a investigar la dieta de los pollos. Descubrió que la persona que se había encargado primeramente de alimentarlos había realizado economías (sin duda beneficiosas para ella) empleando sobras de comida, principalmente arroz descascarillado, de los almacenes del hospital militar. Sucedió que, al cabo de cuatro meses, había llegado un cocinero nuevo que tomó a su cargo la alimentación de los pollos; éste había dejado de darles sobras, para proporcionarles la comida normal de los pollos, que contenía arroz sin descascarillar. Fue entonces cuando los animales se recuperaron. Eijkman practicó algunos experimentos. Sometió a los pollos a una dieta de arroz descascarillado y los animales enfermaron. Utilizó de nuevo el arroz sin descascarillar y se recuperaron. Era el primer caso de enfermedad por deficiencia en la dieta provocada deliberadamente. Eijkman decidió que esta «polineuritis» que afectaba a las aves era similar en sus síntomas al beriberi humano. ¿Contraían los seres humanos el beriberi a consecuencia de comer únicamente arroz descascarillado? Para el consumo del hombre, el arroz era desprovisto de su cascarilla, principalmente porque se conserva mejor, ya que el germen destruido con la cascarilla del

arroz contiene aceites que fácilmente se enrancian. Eijkman y su colaborador, Gerrit Grijns, se dispusieron a averiguar qué era lo que contenía la cascarilla del arroz que evitaba el beriberi. Por último, consiguieron disolver el factor crucial de la cascarilla y descubrieron que podía atravesar membranas que no conseguían cruzar las proteínas. Evidentemente, la sustancia en cuestión tenía que ser una molécula muy pequeña. Sin embargo, no pudieron identificarla.
Mientras tanto, varios investigadores estudiaban otros factores misteriosos que parecían ser esenciales para la vida. En 1905, el especialista holandés en nutrición, C. A. Pekelharing, halló que todos sus ratones morían al cabo de un mes de ingerir una dieta artificial que parecía lo suficientemente rica en cuanto a grasas, hidratos de carbono y proteínas. Sin embargo, los ratones vivían normalmente cuando añadía a esta dieta unas pocas gotas de leche. En Inglaterra, el bioquímico Frederick Hopkins, que pretendía demostrar la importancia de los aminoácidos en la dieta, llevó a cabo una serie de experimentos en los que, asimismo, se demostraba que existía algo en la caseína de la leche, que, si se añadía a una dieta artificial, fomentaba el crecimiento. Este algo era soluble en agua. Como suplemento dietético, una pequeña cantidad de extracto de levadura era incluso mejor que la caseína. Por su descubrimiento, al establecer que estas sustancias en la dieta eran esenciales para la vida, Eijkman y Hopkins compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología, en 1929.
La siguiente tarea era aislar esos factores vitales en los alimentos. En 1912, tres bioquímicos japoneses, U. Suzuki, T. Shimamura y S. Ohdake, lograron extraer de la cáscara de arroz un compuesto que se manifestaba muy potente contra el beriberi. Dosis de cinco a diez miligramos bastaban para producir la curación en un ave. En el mismo año, el bioquímico de origen polaco Casimir Funk (que trabajaba entonces en Inglaterra y más tarde se trasladó a los Estados Unidos) preparó el mismo compuesto partiendo de la levadura.
Debido a que el compuesto demostraba ser una amina (es decir que contenía el grupo amina, NH_2), Funk lo denominó «vitamina», nombre latino de «vida amina», y supuso que el beriberi, el escorbuto, la pelagra y el raquitismo eran producidos por deficiencias de «vitaminas». La conjetura de Funk resultó correcta en cuanto a su identificación de que todas estas enfermedades eran provocadas por carencias alimenticias. Pero, resultó que no todas las «vitaminas» eran aminas.
En 1913, dos bioquímicos norteamericanos, Elmer Vernon McCollum y Marguerite Davis, descubrieron otro factor vital para la salud, en la mantequilla y la yema de huevo. Ésta era soluble en sustancias grasas, más que en el agua. McCollum lo denominó «soluble A en grasa» en contraste con el «soluble B en agua», nombre que aplicó al factor antiberiberi. En ausencia de datos químicos sobre la naturaleza de los factores, esta forma de denominación parecía bastante lógica y así se inició la costumbre de denominar estos factores por medio de letras. En 1920, el bioquímico británico Jack Cecil Drummond cambió estos nombres por los de «vitamina A», y «vitamina B», quitando la «e» inglesa final de «vitamine», como primer paso de su intención de eliminar la «amina» del nombre, y sugirió, además, que el factor antiescorbútico era la tercera de tales sustancias, a la que denominó «vitamina C».
La vitamina A fue pronto identificada como el factor alimentario necesario para evitar el desarrollo de una sequedad anormal en las membranas situadas alrededor del ojo, denominada «xeroftalmía», a partir de las palabras griegas que significan «ojos secos». En 1920, McCollum y sus colaboradores descubrieron que una sustancia contenida en el aceite de hígado de bacalao, que era eficaz en la curación tanto de la xeroftalmía como de una enfermedad de los huesos llamada «raquitismo», podía ser tratada, de modo que sólo curase el raquitismo. Decidieron, así, que el factor antirraquitismo debía ser una cuarta vitamina, que denominaron vitamina D. Las vitaminas D y A son solubles en las grasas, y la C y la B lo son en agua.
En 1930, se había hecho ya evidente que la vitamina B no era una sustancia simple, sino una mezcla de componentes con distintas propiedades. El factor alimenticio que curaba el beriberi fue

denominado vitamina B_1 a un segundo factor se le llamó vitamina B_2 y así sucesivamente. Algunos de los informes sobre nuevos factores resultaron ser falsas alarmas, por lo que ya no se oye hablar de vitamina B_3, B_4 o B_5. Sin embargo, los números siguieron ascendiendo hasta llegar al 14. El grupo de vitaminas, globalmente considerado, es denominado con frecuencia «complejo vitamínico B».

Se añadieron asimismo nuevas letras. De éstas, las vitaminas E y K (ambas solubles en grasas) continuaron siendo verdaderas vitaminas, pero la «vitamina F» resultó no ser una vitamina, y la vitamina H, demostró ser una de las vitaminas del complejo B. Sin embargo, una vez identificada su constitución química, las letras de incluso las verdaderas vitaminas han caído en desuso, y la mayor parte de ellas se conocen por sus nombres químicos, aunque las vitaminas solubles en grasas, por alguna razón especial, han mantenido sus denominaciones con mayor tenacidad que las solubles en agua.

No resultó fácil averiguar la composición química y estructura de las vitaminas, pues estas sustancias se producen sólo en cantidades pequeñísimas. Por ejemplo, una tonelada de cascarilla de arroz contiene tan sólo unos 5 gramos de vitamina B. Hasta 1926, nadie logró extraer suficiente vitamina pura para poder analizarla químicamente.

Dos bioquímicos holandeses, Barend Coenraad Petrus Jansen y William Frederick Donath, determinaron una composición de la vitamina B, partiendo de una pequeñísima muestra, pero resultó equivocada. En 1932, Ohdake trató de conseguirlo de nuevo, con una muestra algo mayor, y casi obtuvo el resultado correcto. Fue el primero en detectar un átomo de azufre en una molécula vitamínica.

Finalmente, en 1934, Robert R. Williams, por aquel entonces director químico de los «Bell Telephone Laboratories», culminó veinte años de investigaciones separando laboriosamente la vitamina B_1 a partir de varias toneladas de cáscaras de arroz, hasta que obtuvo la cantidad suficiente para elaborar una fórmula estructural completa. Ésta es:

Puesto que la característica más imprevisible de la molécula era el átomo de azufre *(theion* en griego), la vitamina fue denominada «tiamina».

La vitamina C ofrecía un tipo de problema distinto. Los frutos cítricos proporcionaban una fuente comparativamente rica de este material, pero la dificultad estribaba en hallar un animal de experimentación que no fabricase su propia vitamina C. La mayor parte de los mamíferos, excepto el hombre y los demás primates, han mantenido su capacidad de producir esta vitamina. Sin un animal de experimentación, barato y sencillo, capaz de contraer escorbuto, era difícil seguir la localización de la vitamina C entre las diversas fracciones en las que se descompone químicamente el zumo de frutas.

En 1918, los bioquímicos norteamericanos B. Cohen y Lafayette Benedict Mendel resolvieron el problema, al descubrir que los conejillos de Indias no producían esta vitamina. De hecho, los conejillos de Indias adquirían el escorbuto mucho más fácilmente que el hombre. Pero quedaba por resolver otra dificultad. La vitamina C resultó ser muy inestable (es la más inestable de las vitaminas), por lo que se perdía fácilmente en los procesos químicos llevados a cabo para aislarla. Gran número de investigadores persiguieron incansablemente la vitamina sin éxito alguno.

Como sucede muchas veces, la vitamina C fue aislada finalmente por alguien que no estaba particularmente interesado en el problema. En 1928, el bioquímico húngaro Albert Szent-Györgyi, que entonces trabajaba en Londres en el laboratorio de Hopkins y se hallaba interesado principalmente en averiguar cómo los tejidos pueden usar el oxígeno, aisló, a partir de la col, una sustancia que ayudaba a transferir átomos de hidrógeno de un compuesto a otro.

Poco después, Charles Glen King y sus colaboradores, en la Universidad de Pittsburgh, que *sí estaban* buscando la vitamina C, prepararon la misma sustancia y encontraron que resultaba fuertemente protectora contra el escorbuto. Más aún, descubrieron que era idéntica a los cristales que habían obtenido a partir del zumo de limón. King determinó su estructura en 1933, resultando ser una molécula de azúcar con seis átomos de carbono, perteneciente a la serie-L, en lugar de a la serie-D:

Fue denominado «ácido ascórbico» (procedente de las palabras griegas que significan «no escorbuto»).
En cuanto a la vitamina A, el primer indicio referente a su estructura procedió de la observación de que los alimentos ricos en vitamina A tenían a menudo un color amarillo o naranja (mantequilla, yema de huevo, zanahorias, aceite de hígado de bacalao). La sustancia responsable, en gran parte, de este color resultó ser un hidrato de carbono denominado «caroteno», y, en 1929, el bioquímico británico Thomas Moore demostró que las ratas alimentadas con dietas que contenían caroteno almacenaban vitamina A en el hígado. La propia vitamina no era de color amarillo, por lo que se dedujo que, aunque el caroteno no era la vitamina A, el hígado lo convertía en algo que sí era vitamina A. (El caroteno se considera hoy día como un ejemplo de «provitamina».) En 1937, los químicos norteamericanos Harry Nicholls Holmes y Ruth Elizabeth Corbet aislaron la vitamina A en forma de cristales, a partir del aceite de hígado de bacalao. Resultó ser un compuesto con 20 átomos de carbono, la mitad de una molécula de caroteno, con un grupo hidroxilo añadido:

Los químicos que buscaban la vitamina D encontraron su mejor pista química por medio de la luz solar. Ya en 1921, el grupo McCollum (el primero en probar la existencia de la vitamina) demostró que las ratas no desarrollaban raquitismo aún con una dieta sin vitamina D, si eran expuestas a la luz solar. Los bioquímicos supusieron que la energía de la luz solar convertía alguna provitamina de su cuerpo en vitamina D. Puesto que la vitamina D era soluble en las grasas, se pusieron a buscar la provitamina en las sustancias grasas de los alimentos. Descomponiendo las grasas y exponiendo cada fragmento por separado a la luz del sol, determinaron que la provitamina que la luz del sol convertía en vitamina D era un esteroide. ¿Qué esteroide? Probaron el colesterol, el esteroide más corriente en el organismo, pero no era éste. Más tarde, en 1926, los bioquímicos británicos Otto Rosenheim y T. A. Webster descubrieron que la luz solar debía convertir un esteroide muy parecido, el «ergosterol» (así llamado porque fue aislado por vez primera a partir del cornezuelo del centeno) en vitamina D. El químico alemán Adolf Windaus descubrió lo mismo por su cuenta, y aproximadamente en la misma fecha. Por éste y otros trabajos sobre los esteroides, Windaus recibió el premio Nobel de Química en 1928.
La dificultad en producir vitamina D a partir del ergosterol estribaba en el hecho de que el ergosterol no está presente en los animales. La provitamina humana fue identificada finalmente como «7-dehidrocolesterol», que difiere del colesterol en que tiene dos átomos de hidrógeno menos en su molécula. La vitamina D formada a partir del mismo tiene esta fórmula:

La vitamina D se llama, en una de sus formas, «calciferol», de las palabras latinas que significan «portador de calcio», porque es esencial para la correcta formación de la estructura ósea.
No todas las vitaminas denuncian su ausencia produciendo una enfermedad aguda. En 1922, Herbert McLean Evans y K. J. Scott, de la Universidad de California, consideraron que había una vitamina implicada en la causa de la esterilidad en los animales. Evans y su grupo no consiguieron aislarla hasta 1936; era la vitamina E. Se le dio el nombre de «tocoferol» (derivada de las palabras griegas que significan «para tener niños»).
Por desgracia, no se sabe si los seres humanos necesitan vitamina E, ni en qué cantidad. Obviamente, los experimentos dietéticos destinados a provocar la esterilidad no pueden realizarse en el hombre. E, incluso en los animales, el hecho de que puedan ser esterilizados suprimiendo la vitamina E no significa necesariamente que la esterilidad natural se origine por esta causa.
En la década de 1930, el bioquímico danés Carl Peter Henrik Dam descubrió, por medio de experimentos en pollos, que en la coagulación de la sangre intervenía una vitamina. La llamó *Koagulationsvitamine, y* eventualmente este término se acortó para denominarlo vitamina K. Edward Doisy y sus colaboradores en la St. Louis University aislaron la vitamina K y determinaron su estructura. Dam y Doisy compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1943.
La vitamina K no es una vitamina principal, ni un problema nutricional. Normalmente, las bacterias de los intestinos producen una cantidad mas que suficiente de esta vitamina. De hecho, fabrican tanta que las heces pueden ser más ricas en vitamina K que los propios alimentos. Los recién nacidos son quienes más probabilidades tienen de padecer una deficiencia en la coagulación sanguínea, con las consiguientes hemorragias, por deficiencia en vitamina K. En los modernos e higiénicos hospitales, los niños necesitan tres días para acumular una cantidad razonable de bacterias intestinales; se protege al niño y a la madre antes del nacimiento, mediante inyecciones de vitamina. Antiguamente los niños adquirían las bacterias casi al nacer, y, aunque podían morir de diversas enfermedades e infecciones, estaban a salvo, al menos, de los peligros de la hemorragia.
De hecho, podríamos preguntarnos si sería factible que los intestinos vivieran en una completa carencia de bacterias intestinales o si la simbiosis no se ha vuelto demasiado íntima para prescindir de ella. Sin embargo, existen animales que se han desarrollado, desde el momento de su nacimiento, en condiciones de total esterilidad, e incluso han podido reproducirse en tales condiciones. Han sido mantenidos así ratones a través de doce generaciones. Se han efectuado experimentos de este tipo en la Universidad de Notre Dame, desde 1928.
A finales de la década de 1930 y principios de los años cuarenta, los bioquímicos identificaron unas cuantas vitaminas B adicionales, que hoy se conocen con los nombres de biotina, ácido pantoténico, piridoxina, ácido fólico y cianocobalamina. Estas vitaminas son producidas todas por las bacterias intestinales; es más, se hallan presentes de forma tan universal en todos los alimentos que no han aparecido casos de enfermedades carenciales. De hecho, los investigadores han tenido que alimentar a los animales con dietas especiales que las excluyeran deliberadamente, e incluso añadir «antivitaminas» para neutralizar las fabricadas por las bacterias intestinales, con objeto de ver cuáles son los síntomas de deficiencia. (Las antivitaminas son sustancias similares a las vitaminas en su estructura. Inmovilizan la enzima, evitando que haga uso de la vitamina, por medio de una inhibición competitiva.) La determinación de la estructura de cada una de las distintas vitaminas fue seguida normalmente, al cabo de muy poco tiempo (e incluso fue precedida), por la síntesis de la

misma. Por ejemplo, Williams y su grupo sintetizaron la tiamina en 1937, tres años después de haberse dilucidado su estructura. El bioquímico suizo de origen polaco, Tadeus Reichstein, y su grupo, sintetizaron el ácido ascórbico en 1933, poco antes de que su estructura fuese determinada completamente por King. Otro ejemplo: la vitamina A fue sintetizada en 1936 (también antes de que se completase su estructura) por dos grupos distintos de químicos.

El empleo de vitaminas sintéticas ha permitido reforzar los alimentos (la leche fue el primero de ellos en ser reforzado con vitaminas, ya en 1924) y preparar mezclas vitamínicas a precios razonables para venderlas en las farmacias. La necesidad de tabletas vitamínicas varía con los individuos. De todas las vitaminas, la que con mayor facilidad presenta casos de deficiencia es la vitamina D. Los niños pequeños de los climas norteños, donde la luz solar es débil en el invierno, corren peligro de raquitismo, por lo que pueden requerir alimentos irradiados o suplementos vitamínicos. Pero la dosis de vitamina D (y de vitamina A) debe ser cuidadosamente controlada, ya que una sobredosis puede ser perjudicial. En cuanto a las vitaminas B, cualquiera que esté sujeto a una dieta normal no necesita tomar tabletas. Lo mismo sucede con la vitamina C, que en todo caso no debería presentar problema alguno, ya que hay muy poca gente a la que no le guste el zumo de naranja y que no lo beba regularmente, en estos tiempos en los que se es consciente de la importancia de las vitaminas.

En conjunto, el uso de tabletas vitamínicas, aparte de redundar en beneficio de los laboratorios farmacéuticos, normalmente no perjudica a la gente, y, posiblemente gracias a ellas, la presente generación tiene mayor talla y más peso que las anteriores.

Naturalmente, los bioquímicos sentían curiosidad por averiguar cómo las vitaminas, presentes en el organismo en cantidades tan pequeñas, ejercían efectos tan importantes en la química corporal. La deducción obvia era que tenían algo que ver con las enzimas, también presentes en pequeñas cantidades.

La respuesta llegó finalmente a través de detallados estudios sobre la química de las enzimas. Los químicos dedicados al estudio de las proteínas sabían desde hacía tiempo que algunas proteínas no estaban formadas únicamente de aminoácidos, y que podían existir grupos protéticos no aminoácidos, como el heme en la hemoglobina (véase capítulo X). En general, estos grupos protéticos tendían a estar fuertemente unidos al resto de la molécula. Sin embargo, en las enzimas existían, en algunos casos, porciones no aminoácidas que estaban unidas muy ligeramente y podían ser extraídas sin demasiados problemas.

Ello fue descubierto, en 1904, por Arthur Harden (que poco después descubriría compuestos intermedios que contenían fósforo; véase capítulo XI). Harden trabajó con un extracto de levadura capaz de provocar la fermentación del azúcar. Lo colocó en una bolsa hecha con una membrana semipermeable e introdujo la bolsa en agua dulce. Las moléculas pequeñas podían traspasar la membrana, pero la molécula de proteína, de un tamaño mayor, no podía hacerlo. Después que esta «diálisis» hubiera progresado durante un tiempo, Harden descubrió que se había perdido la actividad del extracto. Ni el fluido del interior de la bolsa ni el del exterior de la misma podían hacer fermentar el azúcar. Si se combinaban ambos fluidos, la actividad se reemprendía. Aparentemente, la enzima estaba formada no sólo por una gran molécula de proteína, sino también por una molécula de «coenzimas», lo suficientemente pequeña como para pasar a través de los poros de una membrana.

La coenzima era esencial para la actividad de la enzima (como si dijéramos el «filo del cuchillo»).

Inmediatamente, los químicos se plantearon el problema de determinar la estructura de esta coenzima (y de parecidos elementos adicionales a otras enzimas). El químico de la Suiza alemana Hans Karl August Simon von Euler-Chelpin fue el primero en obtener un progreso real en este sentido. Como resultado, él y Harden compartieron el premio Nobel de Química en 1929.

La coenzima de la enzima de levadura estudiada por Harden consistía en una combinación de una molécula de adenina, dos moléculas de ribosa, dos grupos de fosfato y una molécula de «nicotinamida». Sin embargo, esta última era una forma que no se encuentra normalmente en los tejidos vivos, por lo que el interés se centró naturalmente en ella. (Se llama «nicotinamida» porque contiene un grupo amida, NH_2CO, y puede formarse fácilmente a partir del ácido nicotínico. El ácido nicotínico está relacionado estructuralmente con el alcaloide del tabaco «nicotina», pero ambos son muy distintos en cuanto a sus propiedades; el ácido nicotínico es necesario para la vida, mientras que la nicotina es un veneno mortal.) Las fórmulas de la nicotinamida y el ácido nicotínico son:

ácido nicotínico nicotinamida

Una vez determinada la fórmula, se la rebautizó pronto con el nombre de «nucleótido difosfopiridina» (DPN) —«nucleótido» por la característica disposición de la adenina, ribosa y fosfato, similar a la de los nucleótidos que forman el ácido nucleico, y «piridina» por el nombre dado a la combinación de átomos que forman el anillo en la fórmula de la nicotinamida.

Pronto se encontró una coenzima muy similar, que difería del DPN únicamente en que contenía tres grupos de fosfato en lugar de dos. A éste, naturalmente, se lo denominó «nucleótido trifosfopiridina» (TPN). Ambos, el DPN y el TPN, demostraron ser coenzimas de determinadas enzimas corporales, todas con la misión de transferir átomos de hidrógeno de una molécula a otra. (Tales enzimas se denominan «deshidrogenasa».) Era la coenzima la que realizaba el verdadero trabajo de transferir el hidrógeno; la enzima apropiada en cada caso seleccionaba el sustrato en el que debía realizarse esta operación.

La enzima y la coenzima tenían, cada una, una función vital, y, si faltaba cualquiera de ellas, la liberación de la energía de los alimentos por medio de la transferencia de hidrógeno se retardaba hasta debilitarse.

Lo más sorprendente era que el grupo nicotinamida representaba la única parte de la enzima que el cuerpo no podía producir por sí mismo. El cuerpo humano puede fabricar todas las proteínas que necesita y todos los ingredientes del DPN y del TPN a excepción de la nicotinamida; ésta debe encontrarse ya elaborada (o al menos en forma de ácido nicotínico) en la dieta.

De lo contrario, se detiene la producción de DPN y TPN y todas las reacciones de transferencia de hidrógeno controlada por ellos se retardan.

¿Era la nicotinamida o el ácido nicotínico una vitamina? Funk (el hombre que acuñó la palabra «vitamina») había aislado ácido nicotínico a partir de la cascarilla del arroz. El ácido nicotínico no era la sustancia que curaba el beriberi, y, por tanto, lo ignoró. Pero, debido a la aparición del ácido nicotínico en relación con las coenzimas, el bioquímico Conrad Arnold Elvehiem y sus colaboradores de la Universidad de Wisconsin lo probaron en otra enfermedad carencial.

En la década de 1920, el físico norteamericano Joseph Goldberger había estudiado la pelagra (algunas veces denominada lepra italiana), una enfermedad endémica en el Mediterráneo y casi epidémica en el sur de los Estados Unidos a principio de este siglo. Los signos más evidentes de la pelagra son una piel seca, escamosa, diarrea y lengua inflamada; algunas veces provoca trastornos mentales. Goldberger observó que la enfermedad afectaba a aquellas personas que tenían una dieta muy limitada (principalmente harina de maíz), y llegaba a diezmar a las familias que poseían una vaca lechera. Comenzó a experimentar con dietas artificiales, alimentando con ellas a animales y a los presos de la cárcel (donde la pelagra parecía frecuente). Por último, consiguió

provocar en los perros la «lengua negra» (una enfermedad análoga a la pelagra) y curarla con un extracto de levadura.

Descubrió que podía curar la pelagra en los presidiarios añadiendo leche en su dieta. Goldberger decidió que aquel hecho estaba relacionado con la existencia de alguna vitamina y la denominó factor P-P («preventivo de la pelagra»).

Fue la pelagra la enfermedad escogida por Elvehiem para probar el ácido nicotínico.

Administró una pequeña dosis de éste a un perro con lengua negra y el perro respondió mejorando considerablemente. Unas pocas dosis más lo curaron por completo. El ácido nicotínico era, pues, una vitamina; era el factor P-P.

La «Asociación Médica Americana», preocupada por la posibilidad de que la gente creyese que el tabaco contenga vitaminas, propuso que la vitamina no fuese denominada ácido nicotínico, y sugirió, para sustituir este nombre, los de «niacina» (una abreviatura de *ácido nicotínico)* o «niacinamida».

Niacina fue el término que se popularizó. Gradualmente se fue poniendo de manifiesto que las diversas vitaminas no eran más que porciones de coenzimas, cada una consistente en un grupo molecular que ni los animales ni tampoco el hombre podían producir por sí mismos.

En 1932, Warburg había descubierto una coenzima amarilla que catalizaba la transferencia de átomos de hidrógeno.

El químico austríaco Richard Kuhn y sus colaboradores aislaron poco después la vitamina B_2, que probó ser amarilla, y que presentaba la siguiente estructura:

La cadena de carbono ligada al anillo medio es como una molécula denominada «ribitol», por lo que la vitamina B_2 fue denominada «riboflavina» (el término «flavina» proviene de una palabra latina que significa «amarillo»). Puesto que el examen de su espectro mostraba que la riboflavina era muy similar en cuanto a color a la coenzima amarilla de Warburg, Kuhn, en 1935, estudió la coenzima en busca de la actividad de la riboflavina y encontró que así sucedía. En el mismo año, el bioquímico sueco Hugo Theorell dilucidó la estructura de la coenzima amarilla de Warburg y demostró que se trataba de la riboflavina con la adición de un grupo fosfato. (En 1954, se demostró que una segunda y más complicada coenzima tenía riboflavina como parte de su molécula.)

Kuhn fue galardonado con el premio Nobel de Química en 1938, y Theorell recibió el de Medicina y Fisiología en 1955. Sin embargo, Kuhn tuvo la desgracia de ser seleccionado para el premio poco después de que Austria fuese absorbida por la Alemania nazi y (al igual que Gerhard Domagk) se vio obligado a rechazarlo.

La riboflavina fue sintetizada, independientemente, por el químico suizo Paul Karrer. Por éste y otros trabajos en el campo de las vitaminas, Karrer fue galardonado con el premio Nobel de

Química en 1937 (compartiéndolo con el químico inglés Walter Norman Haworth, quien había determinado la estructura de las moléculas de los hidratos de carbono).
En 1937, los bioquímicos alemanes K. Lohmann y P. Schuster descubrieron una importante coenzima que contenía tiamina como parte de su estructura. Durante los años cuarenta se descubrieron otras conexiones entre las vitaminas del grupo B y las coenzimas. Piridoxina, ácido pantoténico, ácido fólico y biotina mostraron una tras otra estar ligadas a uno o más grupos de enzimas.
Las vitaminas ilustran de forma excelente la estructura de la economía química del organismo humano. La célula humana no las fabrica, porque sirven únicamente para funciones especiales; por ello corre el razonable riesgo de buscar los suministros necesarios en la dieta. Hay otras muchas sustancias vitales que el cuerpo necesita sólo en pequeñísimas cantidades, pero que debe fabricar por sí mismo. El ATP, por ejemplo, se forma a partir de los mismos elementos con los que se producen los indispensables ácidos nucleicos. Es inconcebible que ningún organismo pueda perder alguna enzima necesaria para la síntesis del ácido nucleico y seguir vivo, porque el ácido nucleico se necesita en tales cantidades que el organismo no puede confiar en la dieta para obtener los elementos necesarios para producirlo. Y ser capaz de crear ácido nucleico implica automáticamente la capacidad de producir ATP. En consecuencia, no se conoce organismo alguno que sea incapaz de fabricar su propia ATP, y, con toda seguridad no descubrirá nunca ninguno. Producir elementos tan esenciales como las vitaminas sería como instalar una maquinaria especial, junto a una cadena de montaje de automóviles, para tornear los pernos y las tuercas. Los pernos y las tuercas pueden obtenerse mucho más fácilmente de otro proveedor auxiliar, sin interferir para nada en la cadena de montaje; del mismo modo, el organismo puede obtener las vitaminas de su dieta, ahorrando así espacio y material.
Las vitaminas ilustran otros hechos muy importantes sobre la vida. Por lo que se sabe, todas las células vivas necesitan vitaminas del grupo B. Las coenzimas son una parte esencial del mecanismo celular de cualquier célula viva, planta, animal o bacteria. La célula puede conseguir la vitamina B de su dieta o fabricarla por sí misma, pero en cualquier caso la necesita si quiere vivir y crecer. Esta necesidad universal de un grupo determinado de sustancias constituye una impresionante prueba de la unidad esencial de todos los seres vivos y de su (posible) descendencia de una primera fuente de vida formada en el primitivo océano.
Mientras que el papel de las vitaminas del grupo B es bien conocido en la actualidad, las funciones químicas de las demás vitaminas ha encontrado siempre mayores dificultades. La única en la que se ha conseguido un avance concreto ha sido la vitamina A.
En 1925, los fisiólogos norteamericanos L. S. Fridericia y E. Holm descubrieron que las ratas alimentadas con una dieta deficitaria en vitamina A no podían desarrollar normalmente sus actividades, si había poca luz. Un examen de sus retinas demostró que eran deficitarias en una sustancia denominada «púrpura visual».
Existen dos clases de células en la retina del ojo: «bastonadas» y «cónicas». Las bastonadas se especializan en la visión con luz escasa y contienen la púrpura visual. La escasez de púrpura visual, por tanto, afecta únicamente a la visión con poca luz y su resultado es lo que se conoce como «ceguera nocturna».
En 1938, el biólogo de Harvard, George Wald, comenzó a estudiar la química de la visión con poca luz. Demostró que la luz hacía que la púrpura visual, o «rodopsina» se separase en dos componentes: la proteína llamada «opsina» y una no proteína llamada «retineno». El retineno demostró ser muy parecido en su estructura a la vitamina A.
En la oscuridad, el retineno se recombina siempre con lo opsina para formar rodopsina. Pero, durante su separación de la opsina por efecto de la luz, un pequeño porcentaje se descompone, porque es muy inestable. Sin embargo, el suministro de retineno se completa a partir de la vitamina A, que es convertida en retineno por medio de la extracción, con la ayuda de enzimas, de dos átomos de hidrógeno. Así, la vitamina A actúa como una reserva de retineno. Si falta vitamina A en la dieta, el suministro de

retineno y la cantidad de púrpura visual disminuye, de lo que resulta ceguera nocturna.

La vitamina A debe tener asimismo otras funciones, ya que una deficiencia de ella provoca sequedad de las membranas mucosas y otros síntomas que no pueden ser exactamente fijados, pero que se traducen en trastornos en la retina del ojo. Sin embargo, dichas funciones continúan desconociéndose.

Lo mismo puede decirse sobre las funciones químicas de las vitaminas C, D, E y K. En 1970, Linus Pauling armó un gran revuelo al afirmar que dosis masivas de vitamina C podrían reducir la incidencia de resfriados. El público agotó las existencias de la vitamina que había en las farmacias. Sin duda, esta teoría habría de sufrir una seria prueba.

Minerales

Es lógico suponer que los materiales que constituyen algo tan asombroso como el tejido vivo deben ser también, a su vez, algo hermoso y exótico. Las proteínas y los ácidos nucleicos son ciertamente asombrosos, pero, sin embargo, es humillante comprobar que los demás elementos que constituyen el cuerpo humano son tan corrientes como el barro, y que todo el conjunto podría ser comprado por unos pocos dólares. (Debiera haber utilizado «centavos», pero la inflación ha aumentado el precio de las cosas.) A principios del siglo XIX, cuando los químicos estaban empezando a analizar los compuestos orgánicos, resultó evidente que el tejido vivo estaba constituido, principalmente, por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Sólo estos cuatro elementos constituían aproximadamente el 96 % de la masa del cuerpo humano. Además, existía también algo de azufre en el cuerpo. Si se queman estos cinco elementos, se hallará una pequeña cantidad de ceniza blanca, en gran parte residuo de los huesos. Esta ceniza es un conjunto de minerales.

No es sorprendente hallar sal común, cloruro sódico, en las enzimas. Después de todo, la sal no es únicamente un condimento para mejorar el sabor de la comida —del que se puede prescindir—, como de la albahaca, el romero o el tomillo. Es un asunto de vida o muerte, únicamente se necesita paladear un poco de sangre para comprobar que la sal es un componente básico del organismo. Los animales herbívoros, que probablemente no son nada sofisticados en lo que se refiere a las delicias en la preparación de los alimentos, soportarán, sin embargo, grandes peligros y privaciones para conseguir una «lengüeta de sal», compensando así la carencia de ella en su dieta de hierbas y hojas.

En una época tan antigua como mediados del siglo XVIII, el químico sueco Johann Gottlieb Gahn había demostrado que los huesos están constituidos, en su mayor parte, de fosfato cálcico, y un científico italiano, V. Menghini, había establecido que la sangre contenía hierro. En 1847, Justus von Liebig halló potasio y magnesio en los tejidos. Posteriormente, a mediados del siglo XIX, los constituyentes minerales del cuerpo conocidos incluían calcio, fósforo, sodio, potasio, cloro, magnesio y hierro. Además, éstos resultaban ser tan activos en el proceso vital como cualquiera de los elementos generalmente asociados a los compuestos orgánicos.

El caso del hierro es el más evidente. Si falta en la dieta, la sangre se vuelve deficiente en hemoglobina y transporta menos oxígeno de los pulmones a las células. Esta enfermedad es conocida como la «anemia por deficiencia de hierro». El paciente empalidece, al carecer del pigmento rojo, y se fatiga debido a la escasez de oxígeno. En 1882, el médico inglés Sidney Ringer halló que el corazón de una rana podía ser mantenido con vida y latiendo, fuera de su cuerpo, en una solución (llamada «solución de Ringer») que contenía, entre otras cosas, sodio, potasio y calcio, en aproximadamente las mismas proporciones halladas en la sangre de la rana. Todos eran esenciales para el funcionamiento del músculo. Un exceso de calcio determinaba que el músculo se contrajera de modo permanente («rigor del calcio»), mientras que un exceso de potasio obligaba al músculo a una relajación constante («inhibición del potasio»). Además, el calcio era vital para la coagulación de la sangre.

En su ausencia, la sangre no se coagulaba, y ningún otro elemento podía sustituir el calcio en este sentido.
Eventualmente se descubrió que, de todos los minerales, el fósforo era el que conseguía las funciones más variadas y cruciales en la mecánica química de la vida (véase capítulo XII).
El calcio, un componente principal del hueso, constituye el 2 % del peso total del cuerpo; el fósforo, el 1 %.
Los otros minerales mencionados están presentes en pequeñas proporciones, el menor de ellos el hierro, que forma solamente el 0,004 % del total del cuerpo humano.
(Esto permite todavía que exista un promedio de 2,8 g de hierro en los tejidos de un varón adulto.)
Pero no hemos llegado todavía al final de la lista; existen otros minerales que, aunque presentes en los tejidos en cantidades sólo difícilmente detectables, sin embargo, son esenciales para la vida. La mera presencia de un elemento no es necesariamente significativa; puede ser tan sólo una impureza. En nuestra comida, ingerimos por lo menos trazas de todos los elementos de nuestro medio ambiente, y pequeñas cantidades de ellos pueden hallar el camino hasta nuestros tejidos. Pero elementos tales como la sílice y el aluminio, por ejemplo, no nos aportan absolutamente nada. Por el contrario, el cinc es vital. ¿Cómo puede distinguirse un mineral esencial de una impureza accidental? La mejor forma de conseguirlo es demostrar que alguna enzima necesaria contenga el elemento en forma de traza como un componente esencial. (¿Por qué una enzima? Porque cualquier elemento en forma de traza [llamado oligoelemento] posiblemente no puede de ningún otro modo desempeñar un papel importante.)
En 1939, David Keilin y T. Mann, de Inglaterra, demostraron que el cinc formaba parte integral de la enzima anhidrasa carbónica. Ahora bien, la anhidrasa carbónica es esencial para la asimilación por parte del cuerpo del anhídrido carbónico, y el adecuado manejo de aquel importante material de residuo es a su vez esencial para la vida. De ello se deduce la teoría de que el cinc es indispensable para la vida, y los experimentos demuestran que realmente es así. Ratas alimentadas con una dieta pobre en cinc detienen su crecimiento, pierden vello, sufren escamosis de la piel y mueren prematuramente a causa de la carencia de cinc, del mismo modo que si carecieran de una vitamina.
Del mismo modo se ha demostrado que el cobre, el manganeso, el cobalto y el molibdeno son esenciales para la vida animal. Su ausencia en la dieta da lugar a enfermedades carenciales. El molibdeno, el último de los oligoelementos esenciales en ser identificado (en 1954), es un componente de una enzima llamada «xantinooxidasa». La importancia del molibdeno fue comprobada en primer lugar, en 1940, en relación con las plantas, cuando los científicos investigadores del suelo hallaron que las plantas no crecían adecuadamente en aquellos suelos que eran deficientes en este elemento. Parece que el molibdeno es un componente de ciertas enzimas en microorganismos presentes en el terreno, que catalizan la conversión del nitrógeno del aire en compuestos nitrogenados. Las plantas dependen de esta ayuda procedente de los microorganismos, porque no pueden por sí mismas obtener el nitrógeno a partir del aire. (Éste es solamente uno del considerable número de ejemplos que demuestran la estrecha interdependencia de toda la vida en nuestro planeta. El mundo viviente es una larga e intrincada cadena que puede sufrir cierto perjuicio, o incluso un desastre, si se rompe algún eslabón.)

MINERALES NECESARIOS PARA LA VIDA

Sodio (Na)	*Cinc (Zn)*
Potasio (K)	*Cobre (Cu)*
Calcio (Ca)	*Manganeso (Mn)*
Fósforo (P)	*Cobalto (Co)*
Cloro (Cl)	*Molibdeno (Mo)*
Magnesio (Mg)	*Yodo (I)*
Hierro (Fe)	

No todos los «oligoelementos» son universalmente esenciales. El boro parece serlo en forma de trazas para la vida vegetal, pero no,

aparentemente, para los animales. Ciertos tunicados acumulan vanadio a partir del agua de mar y lo utilizan en su componente transportador de oxígeno, pero pocos de los demás animales, si es que existe alguno más, necesitan vanadio por motivo alguno. Se ha comprobado hoy en día que existen desiertos de oligoelementos, al igual que existen desiertos carentes de agua; ambos generalmente aparecen juntos, pero no siempre. En el suelo de Australia, los científicos han hallado que unos 28 g de molibdeno, en forma de algún compuesto apropiado, esparcidos sobre unas 6,5 Ha de tierra con deficiencia de él, se traduce en un considerable incremento en la fertilidad. Tampoco es éste solamente un problema de las tierras exóticas. Un estudio de la tierra de laboreo americana, en 1960, mostró la existencia de áreas de deficiencia de boro en 41 Estados. La dosificación de los oligoelementos es crucial. Es tan perjudicial en exceso como por defecto, ya que algunas sustancias que son esenciales para la vida en pequeñas cantidades (por ejemplo, el cobre) en grandes cantidades se transforman en venenosas.

Esto, por supuesto, conduce, como una consecuencia lógica, a la muy antigua costumbre de utilizar «fertilizantes» para el suelo. Hasta los tiempos modernos, la fertilización era realizada mediante el uso de los excrementos de los animales, abono o guano, que restituían el nitrógeno y el fósforo al suelo. Sin embargo, la operación estaba en todo momento acompañada de olores desagradables y de la siempre presente posibilidad de una infección. La sustitución de éstos por los fertilizantes químicos, limpios y libres de olor, fue conseguida gracias al trabajo de Justus von Liebig, a principios del siglo XIX.

Uno de los episodios más espectaculares en el descubrimiento de las deficiencias en minerales tuvo lugar con el cobalto. Relacionada con ello estaba la fatal enfermedad, en otro tiempo incurable, llamada «anemia perniciosa».

A principios de la década de 1920, el patólogo de la Universidad de Rochester, George Hoyt Whipple estaba experimentando sobre la reposición de la hemoglobina por medio de diversas sustancias alimentarias. Había sangrado a perros, con objeto de inducir en ellos una anemia, y luego los había alimentado con diversas dietas, para ver cuál de ellas permitía recuperar con mayor rapidez la perdida hemoglobina. No realizaba este experimento porque estuviera interesado en la anemia perniciosa, o en cualquier otro tipo de anemia, sino debido a que se dedicaba a investigar los pigmentos biliares, compuestos producidos por el organismo a partir de la hemoglobina. Whipple descubrió que el alimento que permitía a los perros producir más rápidamente hemoglobina era el hígado.

En 1926, dos médicos de Boston, George Richards Minot y William Parry Murphy, consideraron los resultados de Whipple y decidieron probar el hígado como tratamiento para los pacientes con anemia perniciosa. El tratamiento prosperó. La enfermedad incurable podía ser curada, cuando los pacientes ingerían hígado como una parte de su dieta. Whipple, Minot y Murphy compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1934. Por desgracia, el hígado, aunque es un plato exquisito cuando se cocina apropiadamente, y luego se corta y mezcla cuidadosamente con elementos tales como los huevos, la cebolla y los menudillos de pollo, se convierte en algo insoportable cuando se emplea como dieta permanente. (Al cabo de un tiempo, un paciente podría estar tentado a considerar que la anemia perniciosa resulta preferible a este tratamiento.) Los bioquímicos se dedicaron a investigar la sustancia curativa del hígado, y, en 1930, Edwin Joseph Cohn y sus colaboradores de la Harvard Medical School prepararon un concentrado cien veces más potente que el propio hígado. Sin embargo, para aislar el factor activo fue necesaria una posterior purificación. Por suerte, los químicos de los «Laboratorios Merck» descubrieron, en los años cuarenta, que el concentrado de hígado podía acelerar el crecimiento de ciertas bacterias. Esto proporcionaba una fácil prueba de la potencia de cualquier preparado de éste, de forma que los bioquímicos procedieron a escindir el concentrado en fracciones y a ensayarlas en rápida sucesión. Debido a que la bacteria reaccionaba con la sustancia hepática, en gran parte de la misma forma con que reaccionaba ante la tiamina o la riboflavina, los investigadores sospecharon

entonces con fundadas razones que el factor que estaban buscando era una vitamina B. Lo llamaron «vitamina B_{12}».
En 1948, utilizaron la respuesta bacteriana y la cromatografía, Ernest Lester Smith, en Inglaterra, y Karl August Folkers, en los «Laboratorios Merck», consiguieron aislar muestras puras de vitamina B_{12}. La vitamina demostraba ser una sustancia roja, y ambos científicos pensaron que su color era parecido al de ciertos compuestos de cobalto. Por aquel tiempo se sabía que una deficiencia de cobalto causaba una anemia grave en el ganado y las ovejas. Tanto Smith como Folkers quemaron muestras de vitamina B_{12}, analizaron las cenizas y hallaron que éstas realmente contenían cobalto. El compuesto fue denominado entonces «cianocobalamina». Hasta hoy, es el único compuesto con un contenido de cobalto que ha sido hallado en el tejido vivo.
Por descomposición y posterior examen de los fragmentos, los químicos decidieron rápidamente que la vitamina B_{12} era un compuesto extremadamente complicado, y elaboraron una fórmula empírica de $C_{63}H_{88}O_{14}N_{94}PCo$. Más tarde, un químico británico, Dorothy Crowfoot Hodgkin, determinó su estructura global por medio de los rayos X. El tipo de difracción establecido por los cristales del compuesto permitía crear una imagen de las «densidades electrónicas» a lo largo de la molécula, es decir, de aquellas regiones donde la probabilidad de hallar algún electrón era elevada y de aquellas otras donde esta probabilidad era escasa. Si se trazaban líneas que unieran las regiones con la misma probabilidad, se creaba una especie de imagen esquemática de la forma de la molécula en conjunto.
Esto no resulta tan fácil como parece. Las moléculas orgánicas complicadas pueden producir una dispersión de rayos X verdaderamente formidable en su complejidad. Las operaciones matemáticas requeridas para traducir esta dispersión en densidades electrónicas era enormemente tediosa. En 1944, habían sido solicitadas computadoras electrónicas para colaborar en la formulación estructural de la penicilina. La vitamina B_{12} era mucho más complicada, y Miss Hodgkin tuvo que utilizar una computadora aún más avanzada —el «National Bureau of Standards Western Automatic Computer» (SWAC)— y realizar una pesada labor preparatoria. Sin embargo, esta labor, eventualmente, le representó el premio Nobel de Química, en 1964.
La molécula de vitamina B_{12}, o cianocobalamina, resultó ser un anillo de porfirina asimétrico, en el que se ha perdido el puente de carbono que une a dos de los pequeños anillos, pirrólicos, y con complicadas cadenas laterales en los anillos pirrólicos. Parecía de algún modo más simple que la molécula del heme, pero con esta diferencia clave: donde el heme poseía un átomo de hierro en el centro del anillo porfirínico, la cianocobalamina tenía un átomo de cobalto.
La cianocobalamina es activa en muy pequeñas cantidades cuando se inyecta en la sangre de los pacientes con anemia perniciosa. El organismo puede subsistir solamente con una cantidad de esta sustancia equivalente a la milésima parte de la que precisa de las otras vitaminas B. Cualquier dieta, por tanto, tendría suficiente cianocobalamina para nuestras necesidades. Incluso si esto no ocurría, las bacterias fabricaban en los intestinos rápidamente una pequeña cantidad de ella. ¿Por qué, entonces, podía llegar a producirse anemia perniciosa alguna? En apariencia, los que sufren esta enfermedad son simplemente aquellos que no pueden absorber suficiente vitamina en su cuerpo a través de las paredes intestinales.
Sus heces son realmente ricas en la vitamina (cuya pérdida le está causando la muerte). A partir de los alimentos que están constituidos por hígado, que proporciona un aporte de la vitamina particularmente abundante, tales pacientes consiguen absorber suficiente cianocobalamina para sobrevivir. Pero necesitan cien veces más cantidad de vitamina, si la ingieren por vía oral, que si lo hacen por inyección directa en la sangre.
Algo debe funcionar mal en el aparato intestinal del paciente, impidiendo el paso de la vitamina a través de las paredes de los intestinos. Desde 1929 se ha sabido, gracias a las investigaciones del médico americano William Bosworth Castle, que la respuesta reside de algún modo en el jugo gástrico. Castle llamó «factor

intrínseco» al necesario componente del jugo gástrico, y en 1954, los investigadores hallaron un producto, procedente de la mucosa que reviste el estómago de los animales, el cual ayuda a la absorción de la vitamina y demuestra ser el factor intrínseco de Castle. En apariencia, dicha sustancia no existe en aquellos pacientes con anemia perniciosa. Cuando una pequeña cantidad de ella se mezcla con la cianocobalamina, el paciente no tiene ninguna dificultad en absorber la vitamina a través de los intestinos. El modo exacto como el factor intrínseco ayuda a la absorción no se conoce todavía.

Volviendo a los elementos en forma de trazas... El primero en ser descubierto no fue un metal, sino el yodo, un elemento con propiedades parecidas a las del cloro. Esta historia empieza con la glándula tiroides.

En 1896, un bioquímico alemán, Eugen Baumann, descubrió que el tiroides se distinguía por contener yodo, elemento éste prácticamente ausente de todos los demás tejidos. En 1905, un médico llamado David Marine, que había realizado sus prácticas en Cleveland, se sorprendió de la considerable frecuencia con que el bocio se presentaba en aquella zona. El bocio es una enfermedad conspicua, que en ocasiones produce un aumento de tamaño exagerado del tiroides y hace que sus víctimas se vuelvan torpes y apáticas, o bien nerviosas, superactivas y con ojos saltones. Por el desarrollo de técnicas quirúrgicas en el tratamiento del tiroides anormal, con el consiguiente alivio de las enfermedades bociógenas, el médico suizo Emil Theodor Kocher mereció, en 1909, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

Pero Marine se preguntaba si el aumento de tamaño del tiroides no podía ser resultado de una deficiencia del yodo, el único elemento en el que el tiroides estaba especializado, y si el bocio no podría ser tratado más sabia y expeditivamente mediante fármacos que recurriendo al bisturí. La deficiencia de yodo y la frecuencia del bocio, en el área de Cleveland, podían muy bien estar relacionados, ya que Cleveland, al estar situada muy hacia el interior, podía carecer de yodo, que era tan abundante en el suelo de las regiones cercanas al océano y en los alimentos procedentes del mar que forman una parte importante de la dieta en tales lugares.

Marine experimentó en animales, y, al cabo de diez años, se consideró suficientemente seguro como para intentar administrar compuestos que contenían yodo a sus pacientes de bocio. Probablemente no resultó demasiado sorprendido al encontrar que este tratamiento prosperaba. Más tarde, Marine sugirió que debían añadirse compuestos que contenían yodo a la sal de mesa y a la provisión de agua en las ciudades del interior en las que el terreno fuera pobre en yodo. Sin embargo, esto despertó una fuerte oposición, y se necesitaron otros diez años para conseguir que fuese aceptada de un modo general la yodación del agua y la sal yodada. Una vez que los suplementos de yodo se convirtieron en una rutina, el bocio simple perdió su importancia como una de las calamidades de la Humanidad.

Hoy día, los investigadores americanos (y el público) están comprometidos en estudios y discusiones sobre una cuestión de salud muy parecida —la fluoración del agua, para impedir la caries dental. Este problema todavía está despertando una gran controversia en el terreno político y no científico; hasta ahora, la oposición ha sido mucho más insistente y triunfante que en el caso del yodo. Quizás una razón para ello es que la caries dental no parece un asunto tan grave como la desfiguración que produce el bocio.

En las primeras décadas de este siglo, los odontólogos se dieron cuenta de que la población en ciertas zonas de Estados Unidos (por ejemplo, algunas localidades de Arkansas) tendían a mostrar dientes oscuros —una especie de moteado del esmalte. Esta particularidad fue estudiada, hasta hallar un contenido de compuestos de flúor («fluoruros») superior al promedio en el agua natural de bebida en aquellas regiones. Al mismo tiempo, tuvo lugar otro interesante descubrimiento. Cuando el contenido de flúor en el agua era superior al promedio, la población mostraba un índice infrecuentemente bajo de caries dental. Por ejemplo, la ciudad de Salesburg, en Illinois, con flúor en su agua, ofrecía sólo

un tercio de los casos de caries dental en los niños, que la vecina ciudad de Quincy, cuya agua prácticamente no contenía flúor.
La caries dental no es un asunto despreciable, como podrá corroborar todo aquel que ha padecido un dolor de muelas. Representa un gasto a la población de los Estados Unidos superior a los mil quinientos millones de dólares anuales, en facturas al dentista, y dos tercios de todos los americanos han perdido al menos alguna de sus muelas a los 35 años de edad. Los investigadores en el campo de la odontología tuvieron éxito en la obtención de apoyo económico para sus estudios a amplia escala, encaminados a descubrir si la fluoración del agua sería beneficiosa y proporcionaría realmente ayuda para impedir la caries dental. Hallaron que una proporción de flúor, en el agua potable, de 1 : 1.000.000, con un costo estimado de 5 a 10 centavos por persona y año, no llegaba a manchar los dientes y, sin embargo, producía un efecto beneficioso en la prevención de la caries. Por tanto, adoptaron como medida dicha proporción para probar los efectos de la fluoración en las reservas de agua de la comunidad.
En efecto se produce, en primer lugar, en las personas cuyos dientes se están formando; es decir, en los niños.
La presencia de flúor en el agua potable asegura la incorporación de pequeñas cantidades de este elemento a la estructura dental; aparentemente, es esto lo que impide que el diente sea atacado por las bacterias. (El uso de pequeñas cantidades de flúor en forma de píldoras o pasta de dientes ha mostrado también cierto efecto protector contra la caries dental.) Hoy día, los odontólogos están convencidos, sobre la base de un cuarto de siglo de investigación, de que por muy poco dinero por persona y año, la caries dental puede ser reducida en aproximadamente los dos tercios, con un ahorro de al menos mil millones de dólares al año en facturas al dentista, y un alivio del dolor y de las deficiencias dentarias que no puede ser medido en dinero. Las organizaciones odontológicas y médicas de la nación, el Servicio de Salud Pública de los Estados Unidos y las agencias estatales sanitarias recomiendan la fluoración de los suministros públicos de agua, y, sin embargo, en el terreno político, la fluoración ha perdido la mayoría de las batallas. Cerca de 2.000 comunidades, con un total de unos 37 millones de personas, habían fluorado el agua al iniciarse la década de 1960, pero ha continuado existiendo mucha oposición. Un grupo llamado Comité Nacional Contra la Fluoración ha impulsado a una comunidad tras otra a votar contra la fluoración, e incluso a rechazarla en algunos lugares donde había sido adoptada. Se han usado los argumentos principales con el máximo efecto por los oponentes al sistema. Uno es que los compuestos de flúor son venenosos. ¡Lo son, en efecto, pero no en las dosis utilizadas para la fluoración! El otro es que la fluoración constituye una medicación obligatoria, lo cual infringe la libertad individual. Tal vez sea así, pero es un asunto discutible si el individuo en cualquier sociedad puede tener la libertad de exponer a los demás miembros a una enfermedad prevenible. Si la medicación obligatoria es algo pernicioso, entonces tenemos un problema no solamente con la fluoración, sino también con la cloración, la yodación e, igualmente, con todas las formas de inoculación, lo cual incluye la vacunación contra la viruela, que hoy es obligatorio en la mayor parte de los países civilizados del mundo.

Hormonas

Enzimas, vitaminas, oligoelementos, ¡de qué forma tan poderosa estas sustancias diseminadas deciden sobre la vida o la muerte de los tejidos en el organismo! Pero existe un cuarto grupo de sustancias que, de algún modo, es aún más potente. Estas sustancias gobiernan la obra en conjunto; son como un conmutador general que despierta una ciudad a la actividad, o como la válvula reguladora que controla la máquina o la capa roja que excita al toro. A comienzos de siglo, dos fisiólogos ingleses, William Maddock Bayliss y Ernest Henry Starling, quedaron intrigados por una sorprendente pequeña función en el tracto digestivo. La glándula situada detrás del estómago, conocida como el páncreas, descargaba su jugo digestivo en los intestinos superiores, justamente en el momento en que los alimentos abandonaban el estómago y penetraban en el intestino. ¿Cómo se

recibía el mensaje? ¿Qué era lo que informaba al páncreas de que había llegado el momento justo? La suposición obvia era que la información debía ser transmitida a través del sistema nervioso, el cual era el único medio entonces conocido de comunicación en el cuerpo. Probablemente, la penetración en los intestinos de los alimentos procedentes del estómago estimulaba ciertas terminaciones nerviosas que retransmitían el mensaje al páncreas por medio del cerebro o de la médula.

Para probar esta teoría, Bayliss y Starling cortaron todos los nervios del páncreas. ¡Su maniobra fracasó! El páncreas seguía secretando todavía su jugo precisamente en el momento adecuado. Los confundidos experimentadores, siguieron investigando en busca de otro sistema de comunicación. En 1902 consiguieron descubrir un «mensajero químico». Resultó ser una sustancia secretada por las paredes del intestino.

Cuando la inyectaban en la sangre de un animal, estimulaba la secreción del jugo pancreático, incluso aunque el animal no estuviera comiendo. Bayliss y Starling llegaron a la conclusión de que, en el curso normal de los acontecimientos, el alimento que penetra en los intestinos estimula su mucosa para secretar la sustancia, la cual luego viaja a través de la corriente sanguínea hasta el páncreas y desencadena la liberación del jugo pancreático por parte de la glándula. Ambos investigadores denominaron a la sustancia secretada por los intestinos «secretina», y la llamaron «hormona», partiendo de una palabra griega que significa «excitar a la actividad». Hoy día se sabe que la secretina es una pequeña molécula de proteína.

Algunos años antes, los fisiólogos habían descubierto que un extracto de las suprarrenales (dos pequeños órganos situados justamente por debajo de los riñones) Podían elevar la tensión sanguínea si eran inyectados en el organismo. El químico japonés Jokichi Takamine, que trabajaba en Estados Unidos, aisló la sustancia responsable en 1901 y la denominó «adrenalina». (Ésta, posteriormente, se convirtió en un nombre registrado; la denominación actual de los químicos para esta sustancia es «epinefrina».) Su estructura mostraba una gran semejanza con la del aminoácido tirosina, a partir del cual se deriva en el cuerpo. Evidentemente, la adrenalina era también una hormona. A medida que transcurrieron los años, los fisiólogos hallaron que un cierto número de otras «glándulas» en el cuerpo secretaban hormonas. (La palabra «glándula» procede del término griego para designar una bellota, y fue aplicada originalmente a cualquier pequeño abultamiento del tejido corporal. Pero se convirtió en una costumbre dar el nombre de glándula o ganglio a cualquier tejido que secretara un fluido, incluso a órganos grandes, tales como el hígado y las glándulas mamarias. Los órganos pequeños, que no secretaban fluidos gradualmente, fueron perdiendo esta denominación, de forma que los «ganglios linfáticos», por ejemplo, fueron rebautizados con el nombre de «nódulos linfáticos». Aún así, cuando los nódulos linfáticos en la garganta o en la axila aumentan de tamaño durante las infecciones, los médicos y las madres se siguen refiriendo a ellos, igualmente, como «ganglios aumentados de tamaño».) Muchas de las glándulas, como las situadas a lo largo del conducto digestivo, las glándulas sudoríparas y las salivales, descargan sus secreciones a través de conductos. Sin embargo, algunas no poseen conductos; éstas descargan directamente sus sustancias en la corriente sanguínea, la cual luego distribuye las secreciones por el cuerpo. La secreción de estas glándulas sin conductos o «endocrinas» es lo que contiene las hormonas. Por tal motivo, el estudio de las hormonas se denomina «endocrinología».

Como es natural, los biólogos están sumamente interesados en las hormonas que controlan las funciones del cuerpo de los mamíferos y, en particular, las del hombre.

(Sin embargo, al menos, nos gustaría mencionar el hecho de que existen «hormonas vegetales», que controlan y aceleran el crecimiento de las plantas, de «hormonas de los insectos» que controlan la pigmentación y la muda de la piel, etc.) Cuando los bioquímicos hallaron que el yodo estaba concentrado en la glándula tiroides, hicieron la razonable suposición de que dicho elemento formaba parte de una hormona. En 1915, Edward Calvin

Kendall, de la «Fundación Mayo», en Minnesota, aisló a partir del tiroides un aminoácido que contenía yodo y que se comportaba como una hormona, al que llamó «tiroxina». Cada molécula de tiroxina contenía cuatro átomos de yodo. Al igual que la adrenalina, la tiroxina tiene un gran parecido familiar con la tirosina —y es manufacturada a partir de ésta en el cuerpo. (Muchos años después, en 1952, la bioquímico Rosalind Pitt-Rivers y sus colaboradores aislaron otra hormonotiroidea— «triyodotironina», llamada así porque su molécula contiene tres átomos de yodo en lugar de cuatro. Es menos estable que la tiroxina, pero tres a cinco veces más activa.) Las hormonas del tiroides controlan el metabolismo del cuerpo humano: excitan las células a la actividad. Las personas que tienen una hipoactividad tiroidea son indolentes, torpes, y después de cierto tiempo, pueden convertirse en retrasados mentales, debido a que las diversas células están funcionando a bajo rendimiento. Por el contrario, las personas con una hiperactividad del tiroides son nerviosas e inquietas, porque sus células están excitadas. Tanto el hipotiroidismo como el hipertiroidismo pueden producir bocio.

El tiroides controla el «metabolismo basal» del cuerpo, es decir, su índice de consumo de oxígeno en completo reposo, en condiciones ambientales confortables —el «consumo en el ocio», por así decirlo— Si el metabolismo basal de una persona está por encima o por debajo del normal, la sospecha recae sobre la glándula tiroides. La medición del metabolismo basal es un procedimiento difícil, ya que el paciente debe ayunar durante un cierto período anterior y descansar incluso durante media hora, mientras se mide el índice, por no hablar de un periodo de descanso aún mayor. En lugar de proceder mediante este engorroso sistema, ¿por qué no ir directamente al grano, es decir, medir la cantidad de hormona controladora que produce, el tiroides? Recientemente, los investigadores han desarrollado un método para medir la cantidad de «yodo ligado a las proteínas» (PBI) en la corriente sanguínea; éste indica el índice de producción de hormonas del tiroides, y así ha proporcionado una prueba sencilla y rápida de la sangre para remplazar la determinación del metabolismo basal. La hormona más conocida es la insulina, la primera proteína cuya estructura fue totalmente dilucidada (véase capítulo XI). Su descubrimiento representó la culminación de una larga cadena de acontecimientos.

La diabetes es el nombre de un conjunto de enfermedades, caracterizadas en general por una sed infrecuente y, en consecuencia, por una eliminación desusada de orina. Es el más común de los errores congénitos del metabolismo. Existen un millón y medio de diabéticos en los Estados Unidos, el 80 % de los cuales tienen más de 45 años. Es una de las pocas enfermedades a las que la mujer es más propensa que el varón; las mujeres diabéticas superan en número al hombre en una proporción de 4 a 3.

El término procede de una palabra griega que significa «sifón» (aparentemente, su descubridor imaginó el agua haciendo continuamente de sifón a través del organismo). La forma más grave de la enfermedad es la «diabetes mellitus». «Mellitus» se deriva de una palabra griega que significa «miel», y se refiere al hecho de que, en los estadios avanzados de ciertos casos de la enfermedad, la orina tiene un sabor dulce. (Esto puede haber sido determinado directamente por algún médico heroico, pero la primera indicación de ello fue más bien indirecta. La orina de los diabéticos tendía a atraer las moscas.) En 1815, el químico francés Michel-Eugene Chevreul consiguió demostrar que el sabor dulce obedecía simplemente a la presencia de azúcar (glucosa). Este resto de glucosa indicaba claramente que el cuerpo no estaba utilizando su alimento de forma eficiente. De hecho, el paciente diabético, pese a incrementarse su apetito, puede perder peso regularmente a medida que la enfermedad avanza. Hasta hace una generación, no existía ningún tratamiento eficaz para combatir la enfermedad.

En el siglo XIX, los fisiólogos alemanes Joseph von Mering y Oscar Minkowski hallaron que la extirpación de la glándula pancreática de un perro daba lugar a una enfermedad de características idénticas a la diabetes humana. Después que Bayliss y Starling descubrieran la hormona secretina, empezó a

sospecharse que una hormona del páncreas podía estar involucrada en la diabetes.
Pero la única secreción conocida del páncreas era el jugo digestivo. ¿De dónde procedía la hormona? Apareció un indicio significativo. Cuando el conducto del páncreas era bloqueado, de forma que no pudiera producir sus secreciones digestivas, la mayor parte de la glándula se resecaba, pero los grupos de células conocidas como «islotes de Langerhans» (llamado así por un médico alemán, Paul Langerhans, que las había descubierto en 1869) permanecían intactas.
En 1916, un médico escocés, Albert Sharpey-Schafer, sugirió, por tanto que los islotes podían estar produciendo la hormona antidiabética. Denominó a la supuesta hormona «insulina», derivada de una palabra latina que significa «isla».
Los intentos para extraer la hormona a partir del páncreas fracasaron estrepitosamente, al principio. Como se sabe hoy día, la insulina es una proteína, y las enzimas que escinden las proteínas (proteolíticas) del páncreas la destruían incluso mientras los químicos estaban intentando aislarla. En 1921, el médico canadiense Frederick Grant Banting y el fisiólogo Charles Herbert Best (que trabajaban en los Laboratorios de John James Rickard MacLeod, en la Universidad de Toronto) intentaron dar un nuevo enfoque al asunto. Primeramente bloquearon el conducto pancreático. La porción de la glándula que producía la enzima se resecó, la producción de enzimas proteolíticas se detuvo, y los científicos pudieron extraer la hormona intacta a partir de los islotes. Ésta demostraba realmente ser eficaz para contrarrestar la diabetes. Banting llamó a la hormona «isletina», pero se impuso el nombre más antiguo y latinizado propuesto por SharpeySchafer. Todavía se utiliza este nombre.
En 1923, Banting y, por algún motivo, MacLeod (cuyo único servicio al descubrimiento de la insulina fue permitir la utilización de su laboratorio durante el verano, mientras estaba de vacaciones) recibieron el premio Nobel de Fisiología y Medicina.
El efecto de la insulina dentro del organismo se manifiesta con la máxima claridad en relación con el nivel de la concentración de glucosa en la sangre. Corrientemente, el cuerpo almacena la mayor parte de su glucosa en el hígado en forma de una clase de almidón llamada «glucógeno» (descubierto en 1856 por el fisiólogo francés Claude Bernard), manteniendo únicamente una pequeña cantidad de glucosa en la corriente sanguínea, con objeto de satisfacer las necesidades inmediatas de energía de las células.
Si la concentración de glucosa en la sangre aumenta excesivamente, esto estimula al páncreas a incrementar su producción de insulina, la cual se vierte en la corriente sanguínea y produce un descenso del nivel de glucosa.
Por otra parte, cuando el nivel de glucosa desciende demasiado, al disminuir la concentración se inhibe la producción de insulina por parte del páncreas, de forma que aumenta el nivel de azúcar. Así se consigue restablecer el equilibrio. La producción de insulina desciende el nivel de glucosa, lo cual disminuye la producción de insulina, que a su vez eleva el nivel de glucosa, esto incrementa la producción de insulina, que nuevamente hace descender el nivel de glucosa, y así sucesivamente. Esto representa un ejemplo de lo que se llama «control de realimentación» *(feedback).* El termostato que controla la calefacción de una casa trabaja del mismo modo.
El mecanismo de retroalimentación es probablemente el procedimiento usual por medio del cual el organismo mantiene una temperatura interna constante. Otro ejemplo es el de la hormona producida por las glándulas paratiroides, cuatro pequeños cuerpos incrustados en la glándula tiroides. La «parathormona» fue finalmente purificada, en 1960, por los bioquímicos americanos Lyman C. Craig y Howard Rasmussen, después de cinco años de trabajo.
La molécula de parathormona es, en cierto modo, mayor que la de la insulina, y está constituida por 83 aminoácidos, con un peso molecular de 9.500. La acción de esta hormona es incrementar la absorción de calcio en el intestino y disminuir la pérdida de calcio a través de los riñones. Cuando la concentración de calcio en la sangre desciende ligeramente por debajo de la normal, se estimula la secreción de hormona. Con una mayor penetración y una menor

fuga de calcio, pronto se eleva el nivel de éste en la sangre; dicho incremento inhibe la secreción de la hormona. Esta interacción entre la concentración de calcio en la sangre y la abundancia de hormona paratiroidea mantiene el nivel de calcio muy cerca del nivel necesario en todo momento. Una cosa excelente, ya que incluso una pequeña desviación del nivel adecuado en la concentración de calcio puede conducir a la muerte. Por esto, la eliminación de la glándula paratiroides es fatal. (En otro tiempo, los médicos, en su ansiedad por disecar secciones del tiroides con objeto de curar el bocio, no prestaban atención al hecho de remover la glándula paratiroides, mucho más pequeña y menos prominente. La muerte del paciente representaba para ellos una lección.) Algunas veces se utiliza la acción del mecanismo de retroalimentación debido a la existencia de dos hormonas que trabajan en direcciones opuestas. Por ejemplo, el doctor Harold Copp de la Universidad de Columbia británica, demostró, en 1961, la presencia de una hormona tiroidea —a la cual denominó «calcitonina»—, que hacía descender el nivel del calcio en la sangre estimulando la deposición de sus iones en los huesos. Con la parathormona actuando en una dirección y la calcitonina en otra, se podía controlar de forma mucho más sutil la realimentación producida por los niveles de calcio en la sangre. (La molécula de calcitonina está formada por una cadena simple de polipéptidos, compuesta de 32 aminoácidos.) En el caso de la concentración de azúcar en la sangre, cuando la insulina está implicada, coopera una segunda hormona, secretada también por los islotes de Langerhans. Los islotes están constituidos por dos clases distintas de células, «alfa» y «beta». Las células beta producen insulina, en tanto que las células alfa producen «glucagón». La existencia de glucagón se sospechó, por vez primera en 1923, y finalmente fue cristalizado en 1955. Su molécula está constituida por una sola cadena de 29 ácidos, y, en 1958, su estructura había sido completamente dilucidada.

El glucagón se opone al efecto de la insulina, de forma que dos fuerzas hormonales actúan en direcciones opuestas, y el equilibrio se modifica muy ligeramente, en un sentido u otro, por el estímulo de la concentración de glucosa en sangre. Las secreciones de la glándula pituitaria (que examinaremos brevemente) ejercen también un efecto opuesto sobre la actividad de la insulina. Por el descubrimiento de este mecanismo, el fisiólogo argentino Bernardo Alberto Houssay compartió (con Cori), en 1947, el premio Nobel de Medicina y Fisiología.

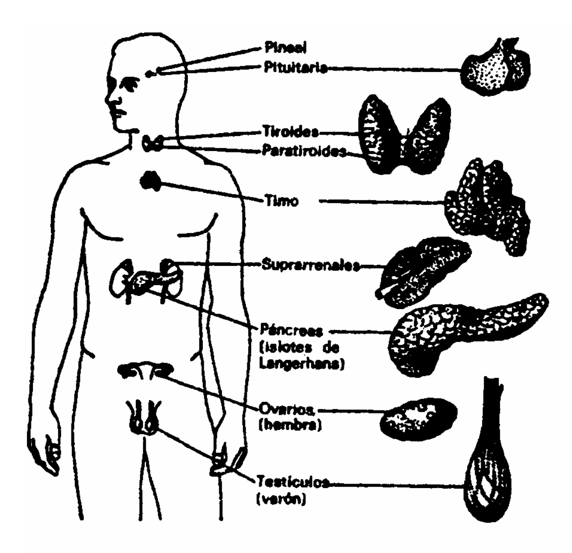
Ahora bien, en la diabetes, el problema estriba en que los islotes han perdido su capacidad de producir suficiente insulina. Por tanto, la concentración de glucosa en la sangre deriva en un sentido ascendente. Cuando el nivel aumente aproximadamente hasta un 50 % superior al normal, traspasa el «umbral renal» —es decir la glucosa se vierte en la orina. En cierto sentido, esta pérdida de glucosa por la orina representa el menor de dos posibles males, ya que si se permitiera que la concentración de glucosa siguiera aumentando, el incremento resultante de viscosidad de la sangre podría dar lugar a un esfuerzo indebido por parte del corazón. (El corazón está proyectado para bombear sangre, no melazas.)

La forma clásica de comprobar la existencia de diabetes es verificar la presencia de azúcar en la orina. Por ejemplo, unas pocas gotas de orina pueden ser calentadas, juntamente con la «solución de Benedict» (llamada así por el químico americano Francis Gano Benedict). Esta solución contiene sulfato de cobre, el cual le da un profundo color azul. Si la glucosa no está presente en la orina, la solución sigue siendo azul. Si la glucosa está presente, el sulfato de cobre se convierte en óxido de cobre. Éste es una sustancia insoluble de un color rojo ladrillo. Por tanto, un precipitado rojizo en el fondo del tubo de ensayo, es un signo indudable de presencia de azúcar en la orina, lo cual generalmente significa diabetes.

Actualmente, se dispone de un método incluso más sencillo. Pequeños trozos de papel, de aproximadamente unos 5 cm de largo, se impregnan con dos enzimas, glucosa-deshidrogenasa y peroxidasa, además de una sustancia orgánica llamada «ortotolidina». El papel amarillento es introducido en una muestra de la orina del paciente y luego expuesto al aire. Si hay presencia

de glucosa, ésta se combina con el oxígeno del aire mediante la ayuda catalítica de la glucosa-deshidrogenasa. Durante el proceso, se forma peróxido de hidrógeno. Luego, la peroxidasa en el papel hace que el peróxido de hidrógeno se combine con la ortotolidina para formar un compuesto fuertemente azul. En resumen, si el papel amarillento es introducido en la orina y se vuelve azul, puede sospecharse firmemente la existencia de diabetes.
Cuando la glucosa ha empezado a aparecer en la orina, esto significa que la diabetes mellitus lleva ya claramente recorrido un largo curso. Es mejor descubrir la enfermedad más precozmente, mediante el examen del nivel de glucosa en la sangre antes de que cruce el umbral renal.
El «test de tolerancia a la glucosa», hoy día de uso extendido, mide el índice de descenso del nivel de la glucosa en la sangre después que ha sido aumentado por la administración previa de glucosa a la persona. Normalmente, el páncreas responde con un torrente de insulina. En una persona sana, el nivel de azúcar regresa a la normalidad dentro de las dos horas siguientes. Si el nivel permanece elevado durante tres horas o más, esto significa una respuesta insulínicadeficiente, y es probable que la persona esté ya en los primeros estadios de la diabetes.
Es posible que la insulina tenga algo que ver con el control del apetito.
Todos hemos nacido con lo que algunos fisiólogos llaman un «centro del hambre» («appestat»), el cual regula el apetito de la misma forma que un termostato regula el funcionamiento de un horno. Si el centro del hambre funciona a un nivel excesivamente alto, el individuo se ve en la situación de estar aportando a su cuerpo continuamente más calorías de las que consume, a menos que ejerza un estricto autocontrol, el cual más pronto o más tarde fracasa.
A principios de los años 40, un fisiólogo, S. W. Ranson, demostró que los animales crecían más gordos tras la destrucción de una porción del hipotálamo (localizado en la parte inferior del cerebro). Esto parece fijar la situación del centro del hambre. ¿Qué es lo que controla su operación? Las «punzadas del hambre» afluyen a la mente. Un estómago vacío se contrae en espasmos, y la penetración de los alimentos da fin a estas contracciones. Quizá estas contracciones sean la señal para el centro del hambre. No es así; la extirpación quirúrgica del estómago nunca ha interferido con el control del apetito.
El fisiólogo de Harvard, Lean Mayer, ha ofrecido una sugerencia más razonable. Él cree que lo que hace el centro del hambre es responder al nivel de glucosa en la sangre. Una vez que el alimento ha sido digerido, el nivel de glucosa en la sangre desciende lentamente. Cuando lo hace por debajo de un cierto nivel, el centro del hambre se pone en marcha. Si en respuesta a las consecuentes urgencias del apetito, la persona come, el nivel de glucosa en su sangre se eleva momentáneamente, y el centro del hambre deja de funcionar.
Las hormonas que hemos estudiado hasta ahora son todas ellas, bien proteínas (como la insulina, el glucagón, la secretina y la parathormona) o aminoácidos modificados (como la tiroxina, la triyodotironina y la adrenalina). Llegamos ahora a un grupo completamente diferente: las hormonas esteroides.
La historia de éstas empiezan en 1927, cuando dos fisiólogos alemanes, Bernhard Zondek y Selmar Aschheim, descubrieron que extractos de la orina de una mujer embarazada, cuando eran inyectados en las hembras de ratas o ratones, incrementaban su celo sexual. (Este descubrimiento les condujo a la primera prueba precoz del embarazo.) Resultó evidente en seguida que había sido hallada una hormona, específicamente, una «hormona sexual». Antes de haber transcurrido dos años, Adolf Butenandt en Alemania, y Edward Doisy, en la Universidad de St. Louis aislaron muestras puras de la hormona. Fue denominada «estrona», a partir de estro, término utilizado para designar el celo sexual en las hembras. Rápidamente se halló que su naturaleza corresponda a un esteroide, con la estructura tetraanular del colesterol. Por su participación en el descubrimiento de las hormonas sexuales. Butenandt compartió (con Ruzicka) el premio Nobel de Química en 1939. Al igual que Domagk y Kuhn, fue

obligado a rechazarlo, y únicamente pudo aceptar dicho honor en 1949, después de terminado el poderío nazi.
En la actualidad, la estrona forma parte de un grupo de hormonas sexuales femeninas conocidas, llamadas «estrógenos» («que dan lugar al estro»). En 1931, Butenandt aisló la primera hormona sexual masculina, o «andrógem») («que origina el impulso sexual masculino»). La llamó «androsterona».
La producción de hormonas sexuales es lo que determina los cambios que tienen lugar durante la adolescencia: el desarrollo del vello facial en el varón y de los senos pronunciados de la mujer, por ejemplo. El complejo ciclo menstrual en la mujer se basa en la interacción de diversos estrógenos. Las hormonas sexuales femeninas se producen en su mayor parte en los ovarios, y las hormonas sexuales masculinas en los testículos.
Las hormonas sexuales no son las únicas hormonas esteroides. El primer mensajero químico no sexual de tipo esteroideo fue descubierto en las suprarrenales. Éstas, realmente, son glándulas dobles, consistiendo en una glándula interna llamada «médula» suprarrenal (procedente de la palabra latina que significa «tuétano») y otra glándula llamada «corteza suprarrenal» (también procedente del latín). Es la médula la que produce la adrenalina. En 1929, los investigadores hallaron que extractos obtenidos a partir de la corteza suprarrenal podían mantener a animales vivos, después que sus glándulas suprarrenales hubieran sido extirpadas —una operación fatal en grado sumo. Naturalmente, de inmediato empezó una investigación en busca de las «hormonas corticales».
La investigación tenía una razón médica práctica, además. La bien conocida dolencia llamada «enfermedad de Addison» (descrita, por vez primera, por el médico inglés Thomas Addison, en 1855) tenía unos síntomas parecidos a los que resultaban de la extirpación de las suprarrenales. Claramente, la enfermedad podía ser causada por una insuficiencia en la producción hormonal de la corteza suprarrenal. Quizá las inyecciones de hormonas corticales podrían combatir la enfermedad de Addison del mismo modo que la insulina lo hacía con la diabetes.
Dos hombres sobresalieron en esta búsqueda. Uno de ellos fue Tadeus Reichstein (quien más tarde había de sintetizar la vitamina C); el otro fue Edward Kendall (quien había descubierto primeramente la hormona tiroidea, cerca de veinte años antes). A finales de la década de 1930, los investigadores habían aislado más de dos docenas de diferentes compuestos procedentes de la corteza suprarrenal. Al menos cuatro de ellos mostraban actividad hormonal. Kendall denominó las sustancias compuestas A. B, E, F, y así sucesivamente. Todas las hormonas corticales demostraban ser esteroides. Ahora bien, las suprarrenales son glándulas muy débiles, y serían necesarias las glándulas de incontables series de animales para proporcionar suficiente extracto cortical para su uso general.
En apariencia, la única solución razonable era intentar sintetizar las hormonas.
Un falso rumor impulsó la investigación sobre hormonas corticales, hasta límites insospechados, durante la Segunda Guerra Mundial. Se habían tenido noticias de que los alemanes estaban comprando glándulas suprarrenales de reses en los mataderos de Argentina, al objeto de fabricar hormonas corticales con las que mejorar la eficiencia de sus pilotos aviadores en los vuelos a gran altura. No existía ninguna base real para ello, pero el rumor tuvo el efecto de estimular al Gobierno de los Estados Unidos para que concediera una alta prioridad a la investigación sobre los métodos de sintetizar las hormonas corticales. La prioridad fue incluso superior a la que se había concedido a la síntesis de la penicilina o de los fármacos contra la malaria.
El compuesto A fue sintetizado por Kendall en 1944, y, al siguiente año, la casa «Merck & Co.» había empezado a producirlo en cantidades sustanciales. Se demostró su escaso valor en la enfermedad de Addison, con el general desencanto. Después de una labor prodigiosa, el bioquímico de «Merck», Lewis H. Sarrett, sintetizó luego, mediante un proceso que implicaba treinta y siete fases, el compuesto E, al cual se conoció con el nombre de «cortisona».



Las glándulas endocrinas.

La síntesis del compuesto E desencadenó de inmediato un pequeño revuelo en los círculos médicos. La guerra estaba terminando; el rumor sobre el tratamiento cortical mágico en los pilotos alemanes se había demostrado falso, y el compuesto A había fracasado. Luego, en un aspecto completamente inesperado, el compuesto E súbitamente se situó en primer lugar.

Durante veinte años, el médico de la «Clínica Mayo», Philip Showalter Hench, había estado estudiando la artritis reumatoide, una enfermedad dolorosa, que en ocasiones desembocaba en la parálisis. Hench sospechaba que el cuerpo humano poseía mecanismos naturales para contrarrestar esta enfermedad, ya que la artritis era a menudo aliviada durante el embarazo o en los ataques de ictericia. No se le ocurrió pensar qué factor bioquímico podía ser común a la ictericia y el embarazo. Intentó inyecciones de pigmentos biliares (implicados en la ictericia) y de hormonas sexuales (involucradas en el embarazo), pero ninguna ayudó a sus pacientes artríticos.

No obstante, varios indicios apuntaban hacia las hormonas corticales como una posible respuesta, y en 1949, con la cortisona disponible ya en una razonable cantidad. Hench lo intentó también, ¡Al fin triunfó! La cortisona no curaba la enfermedad, al igual que la insulina no cura la diabetes, pero parecía aliviar los síntomas, y, para un artrítico, este pequeño resultado representaba un maná caído del cielo. Lo que es más, se demostró posteriormente que la cortisona resultaba de ayuda en el tratamiento de la enfermedad de Addison, donde el compuesto A había fracasado.

Por su trabajo sobre las hormonas corticales. Kendall, Hench y Reichstein compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología en 1950.

Desgraciadamente, las influencias de las hormonas corticales en las actividades del organismo son tan múltiples que existen siempre efectos colaterales, en ocasiones graves. Los médicos son reticentes en el uso de la terapéutica de hormonas corticales, a menos que exista una necesidad clara y urgente. Sustancias sintéticas relacionadas con hormonas corticales (algunas con un átomo de flúor insertado en su molécula) están siendo utilizadas, actualmente, en un intento para aliviar el aspecto más perjudicial de los efectos secundarios, pero hasta el momento no se ha encontrado nada que indique un éxito razonable. Una de las más activas, de entre las hormonas corticales descubiertas hasta ahora, es la «aldosterona», aislada en 1953 por Reichstein y sus colaboradores.

¿Qué es lo que controla las diversas y poderosas hormonas? La totalidad de ellas (incluyendo una serie que no se ha mencionado) puede ejercer efectos más o menos drásticos en el organismo. No obstante, están sintonizadas de un modo tan armónico que mantienen al cuerpo funcionando suavemente, sin una interrupción del ritmo. Al parecer, en algún lugar debe existir un conductor que dirija esta cooperación.

Lo más próximo a una respuesta lo constituye la pituitaria, una pequeña glándula suspendida en la base del cerebro (pero que no forma parte de él). El nombre de esta glándula surgió de una antigua noción de que su función era segregar flema, cuya denominación en latín es *pituita* (el origen también de la palabra

«saliva»). Debido a que esta noción es falsa, los científicos han rebautizado la glándula con el nombre de «hipófisis» (derivada de las palabras griegas que significan «que crece debajo» —por ejemplo, debajo del cerebro—); pero pituitaria es hasta ahora el término más utilizado comúnmente.

La glándula tiene tres partes: el lóbulo anterior, el lóbulo posterior y, en algunos organismos, un pequeño puente que conecta ambos. El lóbulo anterior es el más importante, ya que produce al menos seis hormonas (todas pequeñas moléculas de proteínas), las cuales parecen actuar específicamente sobre otras glándulas carentes de conductos. En otras palabras, la pituitaria anterior puede ser considerada como el director de orquesta que mantiene las otras glándulas tocando al mismo ritmo y en el mismo tono. (Es interesante que la pituitaria esté localizada justamente alrededor del centro del cerebro, como si estuviera colocada deliberadamente en un lugar de la máxima seguridad.) Uno de los mensajeros de la pituitaria es la «hormona estimulante del tiroides» o «tirotrópica» (TSH). Estimula el tiroides sobre la base del mecanismo de retroalimentación. Es decir, obliga al tiroides a producir la hormona tiroidea; el aumento de la concentración de esta hormona en la sangre inhibe a su vez la formación de TSH por la pituitaria. El descenso de TSH en la sangre, por su parte, reduce la producción del tiroides; esto estimula la producción de TSH por la pituitaria, y de este modo el ciclo mantiene un equilibrio.

Del mismo modo, la «hormona estimulante adrenocortical» u «hormona adrenocorticotrópica» (ACTH) mantiene el nivel de las hormonas corticales. Si se inyecta una cantidad de ACTH en el cuerpo, incrementará el nivel de estas hormonas y así puede servir para idéntico objetivo que la inyección de la misma cortisona. Por tanto, la ACTH ha sido utilizada para tratar la artritis reumatoide. La investigación sobre la estructura de la ACTH ha progresado intensamente, debido a que permite aliviar la artritis. A principios de los años cincuenta, su peso molecular había sido determinado en 20.000, pero era fácilmente escindida en fragmentos más pequeños («corticotropinas»), las cuales poseían la actividad completa. Una de ellas, constituida de una cadena de 39 aminoácidos, ha tenido su estructura completamente dilucidada, e incluso cadenas más pequeñas han sido halladas efectivas.

La ACTH posee la capacidad de influir en la pigmentación de la piel de los animales, e incluso el hombre resulta afectado. En aquellas enfermedades en que está implicada una superproducción de ACTH, la piel humana se oscurece. Se sabe que, en los animales inferiores, particularmente en los anfibios, existen hormonas especiales oscurecedoras de la piel. Una hormona de este tipo fue descubierta finalmente entre los productos de la pituitaria en el ser humano, en 1955. Es conocida como la «hormona estimulante de los melanocitos» (los melanocitos son las células que producen la pigmentación de la piel) y generalmente se representa abreviada como «MSH».

La molécula de MSH ha sido ampliamente dilucidada; es interesante indicar que la MSH y la ACTH tienen en común una secuencia de siete aminoácidos. La indicación de que la estructura esté ligada a la función (como, verdaderamente, debe ser) es inequívoca.

Por lo que respecta a la pigmentación, debería mencionarse la glándula pineal, un cuerpo cónico adherido, al igual que la pituitaria, a la base del cerebro, y llamada así a causa de su forma parecida a una piña. La glándula pineal parecía tener realmente una naturaleza glandular, pero hasta finales de la década de 1950 no pudo ser localizada ninguna hormona. Luego, los descubridores de la MSH, trabajando con 200.000 glándulas pineales de buey, aislaron finalmente una pequeña cantidad de sustancia, que, administrada mediante inyección, oscurecía la piel del renacuajo. Sin embargo, la hormona llamada «melatonina» no parecía ejercer efecto alguno sobre los melanocitos humanos.

La lista de las hormonas pituitarias no está todavía completa. Un par de hormonas pituitarias, la ICSH («hormona estimulante de las células intersticiales») (luteinizante) y la FSH («hormona foliculoestimulante») controlan el crecimiento de los tejidos involucrados en la reproducción. Existe también la «hormona lactógena», la cual estimula la producción de leche.

La hormona lactógena estimula otras actividades posteriores al embarazo. Ratas jóvenes hembras inyectadas con la hormona se dedicaron a la construcción del nido, incluso aunque no hubieran tenido ninguna cría. Por otra parte, ratones hembra cuyas pituitarias habían sido extirpadas poco antes de dar a luz a su cría, mostraban un escaso interés hacia éstas. Las revistas, de inmediato, denominaron a la hormona lactógena la «hormona del amor maternal».

Estas hormonas pituitarias, asociadas con los tejidos sexuales, se agrupan conjuntamente con el nombre de «gonadotropinas». Otra sustancia de este tipo es producida por la placenta (el órgano que permite transferir el alimento desde la sangre de la madre a la del feto. Y, en la dirección opuesta, las materias de desecho). La hormona placentaria es denominada «gonadotropina coriónica humana», que se abrevia con la sigla «HCG». De dos a cuatro semanas después del comienzo del embarazo, la HCG es producida en cantidades apreciables y hace su aparición en la orina. Al inyectarse extractos de la orina de una mujer embarazada en ratones, ranas o conejos, pueden descubrirse efectos reconocibles. El embarazo puede así determinarse en un estadio muy temprano.

La más espectacular de las hormonas de la pituitaria anterior es la «hormona somatotropa» (somatropina) (STH), más popularmente conocida como «hormona del crecimiento». Su efecto es el de estimular de un modo general el crecimiento del cuerpo. Un niño que no pueda producir una provisión de hormona suficiente padecerá enanismo. Uno que la produjera en demasía se transformaría en un gigante de circo. Si el trastorno que resulta de una superproducción de hormona del crecimiento no tiene lugar hasta después que la persona ha madurado, (cuando los huesos están completamente formados y endurecidos), solamente las extremidades, como las manos, los pies y el mentón, crecen de un modo exageradamente largo —una circunstancia conocida como «acromegalia» (expresión procedente del griego para indicar «extremidades grandes»). Li (que había determinado primero su estructura en 1966) sintetizó en 1970 esta hormona del crecimiento.

Respecto al modo como trabajan las hormonas, en términos químicos, los investigadores han tropezado hasta ahora con un muro insalvable. No han sido capaces todavía de determinar precisamente cómo una hormona realiza su función.

Parece cierto que las hormonas no actúan como las enzimas. Al menos, no se ha hallado ninguna hormona que catalice una reacción específica directamente. La siguiente alternativa es suponer que una hormona, si no es en sí misma una enzima, actúa sobre una enzima —es decir, que promueve o inhibe una actividad de la enzima—.

La insulina, la hormona que ha sido investigada más exhaustivamente de todas ellas, parece estar claramente relacionada con una enzima llamada «glucoquinasa», la cual es esencial para la conversión de la glucosa en glucógeno. Esta enzima es inhibida por los extractos procedentes de la pituitaria anterior y la corteza suprarrenal, y la insulina puede anular esta inhibición. Así, la insulina en la sangre puede servir para activar la enzima y de este modo favorecer la conversión de glucosa en glucógeno. Esto podría ayudar a explicar cómo la insulina hace descender la concentración de glucosa en sangre.

Sin embargo, la presencia o ausencia de insulina afecta al metabolismo hasta tal punto que resulta difícil comprobar cómo esta simple acción puede producir todas las anormalidades que existen en la química corporal de un diabético. (Lo mismo es válido para otras hormonas.) Por tanto, algunos bioquímicos, se han inclinado a buscar efectos mayores y más globales.

Existe una creciente tendencia a considerar que la insulina actúa de algún modo como un agente para introducir la glucosa en la célula. Según esta teoría, un diabético posee un elevado nivel de glucosa en su sangre sólo por la sencilla razón de que el azúcar no puede penetrar en sus células y, por tanto, él no puede utilizarlo. (Al explicar el insaciable apetito del diabético, Mayer, como ya hemos mencionado, sugirió que la glucosa sanguínea tiene dificultad en penetrar las células del centro del hambre.) Si la

insulina ayuda a la glucosa en la penetración de la célula, entonces es que debe actuar de algún modo sobre la membrana de la célula. ¿Cómo? Nadie lo sabe. En realidad, no se conoce demasiado acerca de las membranas celulares en general, excepto que están compuestas de proteínas y sustancias grasas. Podemos especular que la insulina, como una molécula de proteína, puede, de algún modo, modificar la disposición de las cadenas laterales de aminoácidos en la proteína de la membrana, y así, abrir las puertas a la glucosa (y posiblemente a muchas otras sustancias).

Si estamos inclinados a quedar satisfechos con generalidades de este tipo (y, por el momento, no existe otra alternativa), podemos proseguir basándonos en la suposición de que las otras hormonas también actúan sobre las membranas celulares, cada una de ellas a su modo particular, porque cada una tiene su propia disposición específica de aminoácidos. De forma similar, las hormonas esteroides, como sustancias grasas, pueden actuar sobre las moléculas grasas de la membrana, abriendo o cerrando la puerta a ciertas sustancias. Evidentemente, al ayudar a un material determinado a penetrar la célula o al impedir que lo haga, una hormona puede ejercer un efecto drástico sobre aquello que penetra en la célula. Podría aprovisionar a una enzima con abundancia de substrato para su tarea o privar a otra de material, controlando así lo que la célula produce. Suponiendo que una simple hormona pueda decidir la penetración o no penetración de varias sustancias diferentes, podemos ver cómo la presencia o la ausencia de una hormona podría influir profundamente en el metabolismo, cosa que de hecho ocurre en el caso de la insulina.

El cuadro expuesto anteriormente es sugerente, pero también ambiguo. Los bioquímicos preferirían mucho saber exactamente cómo tienen lugar las reacciones en la membrana celular por influencia de una hormona. La iniciación de tal conocimiento surgió, en 1960, con el descubrimiento de un nucleótido similar al ácido adenílico, salvo una diferencia: el grupo fosfato se adhería a dos lugares distintos en la molécula de azúcar. Sus descubridores, Earl W. Sutherland y T. W. Rall lo llamaron «AMP cíclico». Cíclico, porque el grupo fosfato de doble adherencia formaba un círculo de átomos; y el AMP significaba «adenina monofosfato», un sustituto para el ácido adenílico.

Una vez descubierto el AMP cíclico, se comprobó que estaba muy extendido en los tejidos y surtía acentuados efectos en la actividad de muchas enzimas y procesos celulares diferentes. El AMP cíclico se deriva del ATP —cuya ocurrencia tiene carácter universal— por conducto de una enzima llamada «adenilciclasa» situada en la superficie de las células. Probablemente hay varias de estas enzimas, cada una dispuesta a entrar en actividad ante la presencia de una hormona determinada. Dicho de otra forma, la actividad superficial hormonal sirve para activar una adenilciclasa, lo cual desencadena la producción de AMP cíclico, que a su vez altera la actividad enzimática dentro de la célula ocasionando muchos cambios.

Indudablemente, los pormenores son de una complejidad desmesurada, pues ahí pueden intervenir otros compuestos aparte del AMP cíclico, pero, al menos, ya es un comienzo.

La Muerte

Los adelantos realizados por la medicina moderna en la lucha contra la infección, el cáncer, los trastornos digestivos, etc., han aumentado la probabilidad de que un individuo determinado pueda vivir lo suficiente como para alcanzar la vejez. La mitad de las personas nacidas durante esta generación pueden confiar en alcanzar los 70 años de edad (excepto que estalle una guerra nuclear o alguna otra catástrofe de tipo mayor).

La rareza que, en la Antigüedad, representaba sobrevivir hasta la vejez, sin duda explica, en parte, el extravagante respeto mostrado hacia las personas longevas en aquellos tiempos. La *Ilíada, p*or ejemplo, concede mucho relieve al «viejo» Príamo y «viejo» Néstor. Se describe a Néstor como a una persona que había sobrevivido a tres generaciones de hombres, pero, en un tiempo en el que el promedio de vida no debía ser superior a los 20 ó 25 años.

Néstor no necesitaba tener más de 70 para conseguir esta hazaña. Realmente, a esta edad se es anciano, pero eso no es nada extraordinario en las actuales circunstancias. Debido a que en tiempos de Homero la ancianidad de Néstor causaba semejante impresión en las personas, los mitólogos posteriores supusieron que dicho personaje debía de haber alcanzado algo así como unos 200 años.

Para tomar otro ejemplo al azar; *Ricardo II*, de Shakespeare, empieza con las siguientes palabras: «El viejo John de Gante, Lancaster honrado por su edad.» Los propios contemporáneos de John, según los cronistas de la época, también le consideraban como un anciano. Produce gran sorpresa comprobar que John de Gante vivió solamente hasta los 59 años de edad. Un ejemplo interesante procedente de la historia americana es el de Abraham Lincoln. Sea debido a su barba, o a su cara triste y demacrada, o a las canciones de la época que se referían a él como al «padre Abraham», la mayoría de las personas le consideran como un anciano en el momento de su muerte. Solamente podíamos desear que hubiera vivido lo suficiente para serlo. En realidad, fue asesinado a los 59 años de edad. Todo esto no significa que la auténtica ancianidad fuera desconocida en tiempos anteriores a la medicina moderna. En la antigua Grecia, Sófocles, el dramaturgo, vivió hasta los 90 años, e Isócrates, el orador, hasta los 98. Flavio Casiodoro, en la Roma del siglo V, vivió hasta los 95 años. Enrico Dandolo, el dogo de Venecia del siglo XII, alcanzó los 97 años. Tiziano, el pintor renacentista, sobrevivió hasta los 99. En tiempos de Luis XV, el duque de Richelieu, sobrino-nieto del famoso Cardenal, vivió 92 años, y el escritor francés Bernard Le Bovier de Fontenelle consiguió llegar justamente hasta los 100 años.

Esto pone de manifiesto el hecho de que, aunque el promedio de esperanza de vida, en las sociedades médicamente avanzadas, se ha elevado enormemente, sin embargo, el límite máximo de vida no lo ha hecho. Incluso en la actualidad, esperamos de muy pocos hombres que alcancen, o excedan, el tiempo de vida de un Isócrates o un Fontenelle. Como tampoco esperamos que los modernos nonagenarios sean capaces de participar en las actividades normales con un vigor comparable. Sófocles estaba escribiendo grandes obras a sus 90 años, e Isócrates seguía componiendo grandes discursos. Tiziano pintó hasta el último año de su vida; Dandolo fue el líder indomable de una guerra veneciana contra el Imperio bizantino, a la edad de 96 años. (Entre los ancianos relativamente vigorosos de nuestros días, imagino que el mejor ejemplo es el de George Bernard Shaw, quien vivió hasta los 94 años, y el del matemático y filósofo inglés Bertrand Russell, activo hasta sus últimos días.) Aunque con respecto al pasado una proporción considerablemente mayor de nuestra población alcanza los 60 años, más allá de esta edad la esperanza de vida ha mejorado muy poco. La «Metropolitan Life Insurance Company» calcula que la esperanza de vida de un varón sexagenario americano, en 1931, era aproximadamente la misma que la de un siglo y medio antes —es decir 14,3 años contra la cifra primitivamente calculada de 14,8. Para el promedio de la mujer americana, las cifras correspondientes son de 15,8 y 16,1—. A partir de 1931, la llegada de los antibióticos ha incrementado la esperanza de supervivencia en los sexagenarios de ambos sexos, en unos dos años y medio. Pero, en conjunto, a pesar de todo lo que la Medicina y la Ciencia han aportado, la vejez alcanza a la persona aproximadamente a la misma velocidad y del mismo modo como siempre lo ha hecho. El hombre no ha hallado todavía un modo de evitar el debilitamiento progresivo y la eventual avería de la máquina humana.

Al igual que ocurre con los otros tipos de maquinaria, son las partes movibles las que sufren los efectos en primer lugar. El sistema circulatorio —el corazón y las arterias— es el talón de Aquiles humano, a la corta o a la larga. Su progreso en la conquista de la muerte prematura ha elevado a los trastornos de este sistema al rango de asesino número uno. Las enfermedades circulatorias son responsables de algo más de la mitad de las muertes ocurridas en los Estados Unidos, y, de estas enfermedades, una en particular, la arteriosclerosis, es responsable de una muerte de cada cuatro.

La arteriosclerosis (derivada de las palabras griegas que significan «dureza de la harina») se caracteriza por depósitos grasos de forma granulosa en la superficie interna de las arterias, que obligan al corazón a realizar un mayor esfuerzo para llevar la sangre a través de los vasos a un ritmo normal. La tensión sanguínea aumenta, y el consiguiente incremento en el esfuerzo de los pequeños vasos sanguíneos puede hacerlos estallar. Si esto ocurre en el cerebro (una zona particularmente vulnerable), se produce una hemorragia cerebral o «ataque» En ocasiones, el estallido de un vaso es tan pequeño que únicamente ocasiona un trastorno ligero y temporal, o incluso pasa inadvertido; pero un colapso masivo de los vasos puede conducir a la parálisis o a la muerte súbita.

El endurecimiento y estrechamiento de las arterias es motivo de otro peligro. Debido al aumento de fricción de la sangre que va arañando la superficie interna endurecida de los vasos, tienden a formarse coágulos sanguíneos, y el estrechamiento de los vasos aumenta las posibilidades de que un coágulo pueda bloquear por completo el torrente sanguíneo. Si esto ocurre en la arteria coronaria, que alimenta el propio músculo cardíaco, un bloqueo («trombosis coronaria») puede producir la muerte casi instantáneamente.

Lo que causa exactamente la formación de depósitos en la pared arterial es una cuestión que ha dado lugar a una considerable controversia entre los científicos. En efecto, el colesterol parece estar involucrado en ello, pero la forma en que está implicado no se ha aclarado todavía. El plasma de la sangre humana contiene «lipoproteínas», las cuales consisten en colesterol y otras sustancias grasas ligadas a ciertas proteínas. Algunas de las fracciones que constituyen la lipoproteína mantienen una concentración constante en la sangre, tanto en la salud como en la enfermedad, antes y después de las comidas, etc. Otras fluctúan elevándose después de las comidas. Otras son especialmente elevadas en los individuos obesos. Una fracción, rica en colesterol, es particularmente elevada en las personas con exceso de peso y en aquellas que padecen arteriosclerosis.

La arteriosclerosis acostumbra a ir acompañada de un elevado contenido de grasa en la sangre, y esto es lo que ocurre en la obesidad. Las personas con exceso de peso son más propensas a la arteriosclerosis que las delgadas. Los diabéticos poseen también elevados niveles de grasa en la sangre y son más propensos a la arteriosclerosis que los individuos normales. Y, para completar el cuadro, la incidencia de diabetes entre las personas gruesas es considerablemente más elevada que entre las delgadas.

Así, pues, no es por accidente el que aquellos que consiguen alcanzar edades avanzadas son a menudo individuos delgados y escuálidos. Los hombres grandes y gordos pueden ser alegres, pero, en general, suelen fallecer más pronto. (Por supuesto, existen siempre excepciones, y pueden indicarse hombres como Winston Churchill y Herbert Hoover, quienes celebraron su 90 cumpleaños y que nunca fueron conocidos precisamente por su delgadez.) La cuestión clave, hasta el momento, es si la arteriosclerosis puede ser combatida o prevenida mediante la dieta. Las grasas animales, tales como las de la leche, los huevos y la mantequilla, tienen un contenido particularmente elevado de colesterol; las grasas vegetales lo tienen bajo.

Además, los ácidos grasos de las grasas vegetales son principalmente de un tipo no saturado, lo cual se ha informado que contrarresta el depósito de colesterol. A pesar de que los investigadores de estas cuestiones no han llegado a resultados concluyentes en ningún sentido, la gente se ha abalanzado hacia las «dietas bajas en colesterol», con la esperanza de evitar el endurecimiento de las paredes arteriales. Sin duda, esto no puede perjudicarles.

Por supuesto, el colesterol existente en la sangre no procede del colesterol de la dieta. El cuerpo puede fabricar su propio colesterol con gran facilidad, y así lo hace, e, incluso, si nos alimentamos con una dieta que carezca completamente de colesterol, sin embargo, podemos tener una generosa provisión de colesterol en las lipoproteínas sanguíneas. Por tanto, parece razonable suponer que lo que importa no es la mera presencia del colesterol, sino la tendencia del individuo a depositarlo allí donde puede causar

perjuicio. Cabe la posibilidad de que exista una tendencia hereditaria a fabricar cantidades excesivas de colesterol. Los químicos están investigando en busca de fármacos que inhiban la formación de colesterol, con la esperanza de que tales drogas puedan combatir el desarrollo de la arteriosclerosis en las personas propensas a la enfermedad.

Pero incluso quienes escapan a la arteriosclerosis, también envejecen. La vejez es una enfermedad de incidencia universal. Nada puede detener la debilidad progresiva, el aumento de fragilidad de los huesos, la pérdida de vigor de los músculos, la rigidez de las articulaciones, el descenso de los reflejos, la debilitación de la vista y la declinante agilidad de la mente. La velocidad a que esto tiene lugar es, de algún modo, más baja en unos que en otros, pero, rápido o lento, el proceso es inexorable.

Quizá la Humanidad no debiera quejarse demasiado clamorosamente sobre este punto. Si la vejez y la muerte tienen que llegar inevitablemente, lo cierto es que lo hacen con una lentitud infrecuente en el reino animal. En general, el límite de la vida de los mamíferos está relacionado con su tamaño. El mamífero más pequeño, las musarañas, puede vivir año y medio, y la rata vive 4 o 5 años. El conejo vive 15 años; el perro, 18; el cerdo, 20; el caballo 40, mientras que el elefante puede alcanzar los 70 años de vida. Ciertamente, cuanto más pequeño es el animal, más «rápidamente» vive —más rápido es su ritmo cardíaco, por ejemplo. Puede compararse una musaraña, con un ritmo cardíaco de 1.000 pulsaciones por minuto, a un elefante, que tiene un ritmo de 20 pulsaciones por minuto.

En realidad, los mamíferos, en general, parecen vivir, en el mejor de los casos, tanto tiempo como le lleva a su corazón latir unos mil millones de veces. Sin embargo, de esta regla general, el hombre es la excepción más asombrosa. El ser humano es mucho más pequeño que el caballo y considerablemente más pequeño que el elefante; sin embargo, ningún mamífero consigue vivir tanto tiempo como él. Incluso sin tener en cuenta las leyendas sobre edades avanzadas, procedentes de diversas áreas rurales, donde no ha sido posible realizar registros precisos, existen datos razonablemente convincentes de límites de vida superiores a los 115 años. Los únicos vertebrados en conseguir esto son, sin duda, ciertas tortugas grandes de lentos movimientos.

El ritmo cardíaco humano, de unas 72 pulsaciones por minuto, es precisamente el que podría esperarse de un mamífero de su tamaño. En setenta años, lo cual es el promedio de esperanza de vida del hombre en las áreas tecnológicamente avanzadas del planeta, el corazón humano ha latido 2.500 millones de veces; a los 115 años, ha realizado unos 4.000 millones de latidos. Incluso los parientes más cercanos del hombre, los grandes simios, no pueden igualar esto, ni siquiera acercarse. El gorila, de un tamaño considerablemente mayor que el del ser humano, es considerado viejo a los cincuenta años.

No hay duda de que el corazón humano supera a todos los otros corazones existentes. (El corazón de la tortuga puede vivir más tiempo, pero no lo hace tan intensamente.) No se sabe por qué el ser humano vive tanto tiempo, pero el hombre, dada su naturaleza, está mucho más interesado en averiguar cómo podría alargar aún más este período.

Pero, ¿qué es la vejez? Hasta ahora, sólo existen especulaciones sobre ello. Algunos han sugerido que la resistencia del cuerpo a la infección disminuye lentamente con la edad (en una proporción que depende de la herencia).

Otros especulan sobre «residuos», de, un tipo u otro, que se acumulan en las células (también aquí en una proporción que varía de un individuo a otro). Estos supuestos productos residuales de las reacciones normales de la célula, que ésta no puede destruir ni eliminar, se acumulan lentamente en ella a medida que pasan los años hasta que, finalmente, interfieren con el metabolismo celular en tal grado que éste deja de funcionar. Cuando un número suficiente de células son inactivadas, el cuerpo muere. Una variante de esta teoría sostiene que las propias moléculas de proteínas se convierten en residuos, debido a que se desarrollan entre ellas eslabones cruzados, de forma que se convierten en rígidas y quebradizas y, finalmente, hacen que la maquinaria celular vaya rechinando hasta que llega a detenerse.

Si esto fuera cierto, la «insuficiencia» se produciría entonces dentro del mecanismo celular. Cuando Cartell consiguió, con gran habilidad, mantener vivo durante décadas un trozo de tejido embrionario, hizo creer que las propias células podrían ser inmortales: era la organización lo que nos hacía morir, las combinaciones de células individuales por miles de billones. Ahí fallaba la organización, no las células.
Pero aparentemente no es así. Ahora se piensa que Carrell pudo haber introducido (inadvertidamente) células frescas en su preparado para alimentar el tejido. Diversas tentativas para trabajar con células o grupos celulares aislados, donde se descartaba rigurosamente la introducción de células jóvenes, parecen demostrar que las células envejecen sin remedio —presumiblemente debido a ciertos cambios irreversibles en los componentes fundamentales de la célula.
Y, sin embargo, ahí está la extraordinaria longevidad del hombre. ¿Podría ser que el tejido humano haya desarrollado ciertos métodos, superiores por su eficiencia a los de otros mamíferos, para contrarrestar o neutralizar el envejecimiento celular? Por otra parte, las aves tienden a vivir bastante más tiempo que los mamíferos del mismo tamaño, pese a que su metabolismo es mucho más rápido que el de los mamíferos. He aquí nuevamente la capacidad superior de la vejez para la reversión o la inhibición. Si algunos organismos tienen más recursos que otros para retrasar el envejecimiento, no parece erróneo suponer que sea posible aprender el método y mejorarlo. ¿No sería, entonces, curable la vejez? ¿No podría llegar la Humanidad a disfrutar de una longevidad enorme o incluso, de la inmortalidad? El optimismo a este respecto se ha generalizado entre ciertos grupos humanos. Los milagros médicos en el pasado parecen ser heraldos de milagros ilimitados en el futuro. Y si tal cosa es cierta... ¡uno se avergüenza de vivir con una generación que no sabe cómo curar el cáncer, o la artritis o el envejecimiento! Por consiguiente, hacia finales de la década de 1960, se inició un movimiento cuyos mantenedores propugnaban la congelación de los cuerpos humanos en el momento de la muerte para conservar lo más intacta posible la maquinaria celular hasta el venturoso día en que tuviese cura todo cuanto había causado la muerte de los individuos congelados. Entonces éstos serían reanimados y se les podría dar salud, juventud, felicidad...
Hasta la fecha, no ha habido el menor indicio de que se pueda devolver la vida a un cuerpo muerto ni deshelar un cuerpo congelado —aún cuando estuviese vivo en el momento de la congelación para insuflarle el hálito vital. Los que abogan por tal procedimiento («criogenia») no prestan gran atención a los trastornos que pudieran originarse en la circulación de cuerpos muertos devueltos a la vida... ¡el ansia egocéntrica de inmortalidad impera sobre todo! La congelación de cuerpos para mantenerlos intactos posee escaso sentido, incluso aunque fuera posible reanimarlos. Sería una pérdida de tiempo. Hasta ahora, los biólogos han tenido mucha más fortuna con el desarrollo de organismos completos, grupos de células especializadas. Al fin y, al cabo, las células epidérmicas y renales poseen un equipo genético tan completo como el de las demás y como el que tuvo, en primer lugar, el óvulo fecundado. Las células son elementos especializados porque neutralizan o activan en grado variable los diversos genes. Ahora bien, ¿no sería posible «desneutralizar» o «desactivar» los genes? ¿No podrían éstos transformar entonces su propia célula en el equivalente de un óvulo fecundado y crear de nuevo todo un organismo, es decir, un organismo idéntico —en términos genéticos— a aquél del cual han formado parte? Sin duda este procedimiento (denominado *cloning)* ofrece más promesas para una preservación, por así decirlo, de la personalidad (si no de la memoria). En lugar de congelar un cuerpo entero, ¡secciónese el dedo pequeño del pie y congélese eso!
Pero, ¿acaso deseamos realmente la inmortalidad... bien sea mediante la criogenia o el *cloning* o la simple inversión en cada individuo del fenómeno llamado envejecimiento? Hay pocos seres humanos que no aceptasen gustosamente la inmortalidad, una inmortalidad libre, hasta cierto punto, de achaques, dolores y

efectos del envejecimiento. Pero supongamos, por un momento, que todos fuéramos inmortales.

Evidentemente, si hubiera pocas defunciones o ninguna sobre la Tierra, también habría pocos nacimientos o ninguno. Sería una sociedad sin niños.

Al parecer, eso no es fatídico; una sociedad suficientemente egocéntrica para aferrarse a la inmortalidad no titubearía ante la necesidad de eliminar por completo la infancia.

Pero, ¿le serviría de algo? Sería una sociedad compuesta por los mismos cerebros, fraguando los mismos pensamientos, ateniéndose a los mismos hábitos sin variación alguna, de forma incesante. Recordemos que el niño posee un cerebro no sólo joven, sino también *nuevo.* Cada recién nacido (exceptuando los nacimientos múltiples de individuos idénticos) posee una dotación genética sin la menor similitud con la de cualquier otro ser humano que haya vivido jamás. Gracias a los recién nacidos, la Humanidad recibe una inyección constante de combinaciones genéticas innovadoras; por tanto, se allana el camino para un perfeccionamiento y desarrollo crecientes.

Sería prudente hacer descender el nivel de natalidad, pero, ¿nos conviene anularlo totalmente? Sería muy grato eliminar las dolencias e incomodidades de la vejez, pero, ¿debemos crear a cambio una especie integrada por seres vetustos, cansinos, hastiados, siempre igual, sin dar entrada jamás a lo nuevo y lo mejor? Tal vez la inmortalidad ofrezca peores perspectivas que la propia muerte.

XV. LAS ESPECIES

Las Variedades De La Vida

El conocimiento por parte del hombre de su propio cuerpo no es completo sin una noción de sus afinidades con los demás seres vivientes sobre la Tierra. En las culturas primitivas, este parentesco a menudo era considerado como muy estrecho. Muchas tribus consideraban a ciertos animales como sus antepasados o hermanos de sangre, y pensaban que era un crimen matarlos o comerlos, excepto en ciertas circunstancias rituales. Esta veneración de los animales como dioses o semidioses se conoce con el nombre de «totemismo» (derivado de una palabra india americana), y existen signos de él en culturas ya no tan primitivas. Los dioses con cabeza de animal, en Egipto, representaban restos de totemismo, y quizás, igualmente, lo es la veneración moderna de los hindúes por las vacas y los monos.

Por otra parte, la cultura occidental, representada en las teorías griegas y hebreas, estableció ya desde muy antiguo una clara distinción entre el hombre y los «animales inferiores». Así, la Biblia subraya que el hombre fue creado por Dios «a su imagen y semejanza» (Génesis 1: 26). No obstante, también la Biblia da fe de un interés notablemente profundo por parte del hombre hacia los animales inferiores. El Génesis indica que Adán, en sus idílicos primeros tiempos en el Jardín del Edén, había realizado la tarea de asignar nombres «a cada bestia del campo y a cada ave del cielo».

A primera vista, no parece una labor especialmente difícil algo que podría hacerse, quizás, en una hora o dos. Los cronistas de las Escrituras colocaron «dos animales de cada especie» en el arca de Noé, cuyas dimensiones eran de 137 x 23 x 14 m (si consideramos que el codo tiene una longitud de 38 cm). Los filósofos naturalistas griegos especularon sobre el mundo viviente en términos igualmente limitados: Aristóteles pudo catalogar sólo aproximadamente unas 50 especies de animales, y su discípulo Teofrasto, el botánico más eminente de la antigua Grecia, enumeró únicamente unas 500 plantas diferentes.

Una relación de este tipo tendría sentido sólo si se creyera que un elefante es siempre un elefante, un camello es sólo un camello y una pulga no es más que una pulga. Las cosas empezaron a complicarse más cuando los naturalistas comprobaron que los animales tenían que ser diferenciados sobre la base de sus posibilidades de cruzamiento entre sí. El elefante indio no podía ser cruzado con el elefante africano; por este motivo, ambos tenían que ser considerados como «especies» diferentes de elefantes. El

camello de Arabia (una giba) y el camello de Bactriana (dos gibas) son también especies distintas, y, por lo que respecta a la pulga, los pequeños insectos picadores (que representan en conjunto la pulga común) ¡se dividen en 500 especies diferentes! A través de los siglos, puesto que los naturalistas contabilizaron nuevas variedades de criaturas en la tierra, en el aire y en el mar, y dado que nuevas áreas del mundo quedaron dentro del campo de la observación, debido a la exploración, el número identificado de especies animales y vegetales creció astronómicamente. En el año 1800, alcanzaba ya los 70.000. Hoy día, se conocen más de un millón doscientas cincuenta mil especies diferentes, dos tercios de ellas animales y un tercio plantas, y ningún biólogo se atreve a suponer que la lista esté completa.

El mundo viviente podría resultar excesivamente confuso si no fuéramos capaces de clasificar esta enorme variedad de criaturas de acuerdo con algún esquema de afinidades. Se puede empezar agrupando conjuntamente al gato, tigre, león, pantera, leopardo, jaguar, y otros parecidos al gato, en la «familia del gato»; igualmente, el perro, el lobo, el zorro, el chacal, y el coyote forman la «familia del perro», etc. Basándose en un criterio general sencillo, podrían clasificarse algunos animales como comedores de carne y otros como comedores de plantas. Los antiguos realizaban también clasificaciones generales basadas en el hábitat, y así, consideraron a todos los animales que vivían en el mar como peces y a todos los que volaban por el aire como pájaros. Pero esto podría conducir a considerar la ballena como un pez y al murciélago como un pájaro. Realmente, y en un sentido fundamental, la ballena y el murciélago se parecen más entre sí que la primera a un pez y el otro a un pájaro. Ambos dan a luz crías vivas. Además, la ballena tiene pulmones para respirar el aire, en lugar de las agallas del pez, y el murciélago posee pelo, en vez de las plumas del pájaro. Tanto uno como otro están clasificados dentro de los mamíferos, es decir aquellos animales que engendran criaturas vivas (en lugar de poner huevos) y las alimentan con la leche materna.

Uno de los intentos más antiguos de realizar una ordenación sistemática fue el del inglés John Ray (o Wray), quien en el siglo XVII, clasificó todas las especies conocidas de plantas (aproximadamente 18.600), y más tarde las especies animales, de acuerdo con ciertos sistemas que le parecieron lógicos. Por ejemplo, dividió las plantas con flor en dos grupos principales, según que la semilla contuviera una hoja embrionaria o dos. Esta pequeña hoja embrionaria o par de hojas recibió el nombre de «cotiledón», derivado de la palabra griega utilizada para designar un tipo de copa *(kotyle)*, porque estaban depositadas en una cavidad en forma de copa en la semilla. Por ello, Ray denominó a los dos tipos respectivamente «monocotiledóneas» y «dicotiledóneas». La clasificación (similar, por otra parte, a la realizada 2.000 años antes por Teofrasto) se mostró tan útil que incluso resulta efectiva hoy día. La diferencia entre una y dos hojas embrionarias resulta en sí mismo poco importante, pero existen algunas formas esenciales en las que todas las plantas monocotiledóneas se diferencian de las dicotiledóneas. La diferencia en las hojas embrionarias es sólo una etiqueta, conveniente, significativa, de muchas otras diferencias generales. (Del mismo modo, la distinción entre plumas y pelo es realmente poco importante en sí misma pero resulta una indicación práctica para la considerable serie de diferencias que separa a los pájaros de los mamíferos.) Aunque Ray y otros contribuyeron aportando algunas ideas útiles, el verdadero fundador de la ciencia de la clasificación o «taxonomía» (derivada de una palabra griega que significa «ordenación») fue un botánico sueco, mas conocido por su nombre latinizado de Carolus Linnaeus (Linneo), quien realizó su tarea de forma tan perfecta que las líneas principales de su esquema siguen vigentes todavía. Linneo expuso su sistema en 1737, en un libro titulado *Systema Naturae.* Agrupó las especies que se parecían entre sí en un «género» (de una palabra griega que significa «raza» o «estirpe»), dispuso a su vez los géneros afines en un «orden», y agrupó los órdenes similares en una «clase». Cada especie era denominada con un nombre compuesto por el del género y el de la propia especie. (Esto guarda mucha similitud con

el sistema de la guía telefónica, que alfabetiza Smith, John; Smith, William; y así sucesivamente.) Por tanto, los miembros del género del gato son el *Felis domesticus* (el gato doméstico), *Felis leo* (el león), *Felis pardus* (el leopardo), *Felis tigris* (el tigre), etc. El género al que pertenece el perro incluye el *Canis familiaris* (el perro), *Canis lupus* (el lobo gris europeo), *Canis occidentalis* (el lobo de los bosques americanos), etc. Las dos especies de camellos son el *Camelus bactrianus* (el camello de Bactriana) y el *Camelus dromedaritis* (el camello de Arabia). .

Alrededor de 1880, el naturalista francés Georges Leopold Cuvier avanzó un paso más allá de las «clases» y añadió una categoría más general llamada «tipo» *(phylum)* (a partir de una palabra griega que significa «tribu»). Un tipo incluye todos los animales con la misma disposición general del cuerpo (un concepto que fue subrayado y puesto de manifiesto nada menos que por el gran poeta germano Johann Wolfgang von Goethe). Por ejemplo, los mamíferos, pájaros, reptiles, anfibios y peces están agrupados en un solo tipo, porque todos tienen columna vertebral, un máximo de cuatro miembros y sangre roja con un contenido de hemoglobina. Los insectos, las arañas, los crustáceos y los ciempiés están clasificados en otro tipo; las almejas, las ostras y los moluscos (mejillones) en otro, y así sucesivamente. En la década de 1820, el botánico suizo Augustin Pyramus de Candolle, de forma similar, perfeccionó el sistema de clasificación de las plantas de Linneo. En lugar de agrupar las especies entre sí según su apariencia externa, concedió mayor importancia a su estructura y funcionamiento internos.

El árbol de la vida fue ordenado entonces, tal como se describirá en los párrafos siguientes, partiendo de las divisiones más generales hasta llegar a las más específicas.

Empezaremos con los «reinos» —vegetal, animal, e intermedio (es decir aquellos microorganismos, como las bacterias, que no pueden ser definitivamente clasificados como plantas o animales propiamente dichos). El biólogo germano Ernst Heinrich Haeckel sugirió, en 1866, que este grupo intermedio fuera llamado «Protistos», término que viene siendo cada vez más utilizado por los biólogos, a pesar de que el mundo de los seres vivientes está todavía dividido exclusivamente, hablando en términos populares, en «animal y vegetal».

El reino vegetal, según un sistema de clasificación, se divide en dos subreinos. En el primer subreino, llamado Talofitas, figuran todas las plantas que no poseen raíces, tallos u hojas: a saber, las algas (las plantas verdes unicelulares y los diversos líquenes), que contienen clorofila, y los hongos (los mohos unicelulares y organismos tales como las setas), que no la poseen. Los miembros del segundo subreino, los Embliofitas, se dividen en dos tipos principales: Biofritas (los distintos musgos) y Traqueofitas (plantas con sistemas de tubos para la circulación de la savia), que incluyen todas las especies que ordinariamente consideramos plantas.

Este último gran tipo consta de tres clases principales, las Filicinas, las Gimnospermas, y las Angiospermas. En la primera clase están los helechos, que se reproducen mediante esporas. Las Gimnospermas, que forman las semillas en la superficie de los órganos reproductores, incluyen los diversos árboles coníferos siempre verdes. Las Angiospermas, con las semillas encerradas en los ovarios, constituyen la mayor parte de las plantas familiares.

Igualmente, por lo que se refiere al reino animal, enumeraremos solamente los tipos más importantes.

Los Protozoos («primeros animales») son, por supuesto, los animales unicelulares. A continuación están los Poríferos, animales que consisten de colonias de células dentro de un esqueleto poroso; éstas son las esponjas.

Las células individuales muestran signos de especialización, pero conservan una cierta independencia, pues aunque si en definitiva se separan filtrándose a través de tejido de seda, pueden agregarse para formar una nueva esponja.

(En general, a medida que los tipos animales se hacen más especializados, las células y los tejidos individuales se vuelven menos «independientes». Las criaturas simples pueden volver a crear su organismo completo, incluso aunque éste haya sido bárbaramente mutilado, proceso que recibe el nombre de

«regeneración». Otros organismos más complejos pueden regenerar los miembros. Sin embargo, para el tiempo de existencia que le concedemos al hombre, la capacidad de regeneración se ha mostrado muy decepcionante. Somos capaces de regenerar una uña perdida, pero no un dedo perdido.) El primer tipo cuyos miembros pueden ser considerados realmente como animales multicelulares es el de los Celentéreos (palabra que significa «intestino hueco»), Estos animales tienen básicamente la forma de una copa y constan de dos capas de células: el ectodermo («piel exterior») y el endodermo («piel interior»). Los ejemplos más comunes de este tipo son las medusas y las anémonas marinas.

Todos los demás tipos animales tienen una tercera capa de células: el mesodermo («piel media»). A partir de estas tres capas, reconocidas por vez primera, en 1845, por los fisiólogos alemanes Johannes Peter Müller y Robert Remak, se forman la multiplicidad de órganos de los animales, incluso los más complejos, entre los que se encuentra el hombre.

El mesodermo se origina durante el desarrollo del embrión y la forma en que lo hace divide a los animales implicados en dos «supertipos». Aquellos en los que el mesodenno se forma en la unión del ectodermo y el endodenno constituyen el supertipo Anélido; los animales en los cuales el mesodermo se origina solamente en el endodermo forman el supertipo Equinodermo.

Consideremos primeramente el supertipo Anélido. Su tipo más simple es el de los Platelmintos (del griego «gusanos aplanados»). Éstos incluyen no solamente el parásito solitaria, sino también formas vivientes libres. Los gusanos aplanados tienen fibras contráctiles que pueden ser consideradas como músculos primitivos, y poseen también cabeza, cola, órganos especiales para la reproducción y lo que puede considerarse el comienzo de órganos excretores. Además, los gusanos aplanados muestran simetría bilateral: es decir, que sus lados izquierdo y derecho son las correspondientes imágenes de sus contrarios en el espejo. Se desplazan hacia delante, y sus órganos de los sentidos y nervios rudimentarios están concentrados en el área de la cabeza, de forma que puede afirmarse de ellos que poseen un cerebro rudimentario.

A continuación sigue el tipo Nematodos (procedente de la palabra griega que significa «en forma de hilo»), cuyo miembro más conocido es la lombriz intestinal. Estas criaturas poseen un primitivo flujo sanguíneo: un fluido en el interior del mesodermo que baña todas las células y transporta los alimentos y el oxígeno hasta ellas. Esto hace que los nematodos, en contraste con los animales como la aplanada solitaria, tengan un cierto volumen, para que el fluido pueda llevar el alimento a las células interiores. Los nematodos poseen también un intestino con dos aberturas, una para la entrada de alimentos y la otra (el ano) para la eyección de los residuos.

Los dos tipos siguientes en este supertipo poseen duros «esqueletos» externos, es decir, conchas (que se hallan en algunos de los tipos más simples también). Estos dos grupos son los Braquiópodos, que tienen conchas dorsoventrales de carbonato de calcio y los Moluscos (de la palabra latina «blando»), cuyos cuerpos blandos están encerrados en conchas que se originan desde los lugares derecho e izquierdo del animal, en lugar del dorso y el vientre. Los moluscos más familiares son las almejas, las ostras, y los caracoles. Un tipo particularmente importante dentro del supertipo Anélido es el de los Anélidos. Éstos son también gusanos, pero con una diferencia: están constituidos por segmentos, pudiendo ser considerado cada uno de ellos como una especie de organismo en sí mismo. Cada segmento tiene sus propios nervios que se ramifican a partir del tronco nervioso principal, sus propios vasos sanguíneos, sus propios túbulos para la conducción de los residuos al exterior, sus propios músculos, y así sucesivamente. En el anélido más familiar, la lombriz de tierra, los segmentos están claramente marcados por pequeñas constricciones de la carne, que parecen como diminutos anillos alrededor del animal; en realidad, Anélidos es una palabra que procede del latín y significa «pequeño anillo».

Aparentemente, la segmentación proporciona al animal una eficiencia superior, por lo cual las especies más predominantes del reino animal, incluyendo el hombre, están segmentadas. (De los animales no segmentados, el más complejo y logrado es el

calamar.) Si queremos saber en qué forma está segmentado el cuerpo humano, consideremos las vértebras y las costillas; cada vértebra de la columna vertebral y cada costilla representan un segmento separado del cuerpo, con sus propios nervios, músculos y vasos sanguíneos. Los anélidos, al carecer de esqueleto, son blandos y relativamente indefensos. No obstante, el tipo Artrópodos («pies articulados») consigue combinar la segmentación con el esqueleto, siendo éste tan segmentado como el resto del cuerpo. El esqueleto no sólo es más manejable debido a su capacidad de articulación, sino también ligero y flexible, estando constituido por un polisacárido llamado «quitina», en lugar de la maciza e inflexible piedra caliza o carbonato cálcico. Considerados globalmente, los artrópodos, que incluyen las langostas, las arañas, los ciempiés y los insectos, es el tipo más abundante de todos los existentes. Al menos, comprende mayor número de especies que todos los otros tipos juntos.

Esto rige sólo para los tipos principales del supertipo Anélido. El otro supertipo, el Equinodermo, contiene únicamente dos tipos importantes. Uno es el Equinoideo («piel espinosa»), que incluye criaturas tales como la estrella marina y el erizo de mar. Los Equinodermos se diferencian de los otros tipos dotados de mesodermo en que posee una simetría radial y en no tener una cabeza y una cola claramente definidas (aunque, en la Antigüedad, los equinodermos mostraban simetría bilateral, condición que han perdido a medida que han ido madurando).

El segundo tipo importante del supertipo Equinode no es verdaderamente importante, dado que a él pertenece el hombre. La característica general que distingue a los miembros de este tipo (que abarca el hombre, el avestruz, la serpiente, la rana, la caballa, y una diversidad de otros animales) es el esqueleto interno. Ningún animal, aparte de este tipo, lo posee. El signo particular de tal esqueleto es la columna vertebral. En realidad, la columna vertebral es una característica tan importante que, en el lenguaje común, todos los animales están ampliamente divididos en vertebrados. Realmente, existe un grupo intermedio que tiene una varilla de cartílago llamada «notocordio» («cuerda dorsal») en lugar de la columna vertebral. El notocordio, descubierto por vez primera por Von Baer, quien también había descubierto el huevo de los mamíferos, parece representar una columna vertebral rudimentaria; de hecho, aparece incluso en los mamíferos durante el desarrollo del embrión. Por ello, los animales con notocordios (diversos seres, como el gusano, la babosa y el molusco) se clasifican entre los vertebrados. El tipo, considerado globalmente, fue denominado Cordados, en 1880, por el zoólogo inglés Francis Maitland Balfour; se divide en cuatro subtipos, tres de los cuales poseen solamente notocordio. El cuarto, con una verdadera columna vertebral y un esqueleto general interno, es el de los vertebrados.

Los vertebrados existentes hoy día forman dos superclases: los Piscis («peces») y los Tetrápodos (animales con «cuatro patas»). El grupo Piscis se compone de tres clases:

1.º Los peces Agnatos («sin mandíbulas»), que tienen verdaderos esqueletos, aunque no miembros o maxilas —el espécimen representativo mejor conocido, la lamprea, posee una serie de limas rasposas contorneando una boca en forma de embudo—;

2.º Los Elasmobranquios («peces cartilaginosos»), con un esqueleto de cartílago en lugar de hueso, de los que el tiburón es el ejemplo más conocido; y

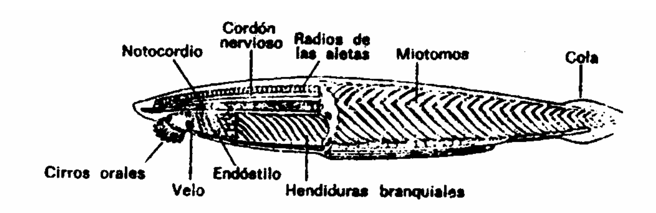
3.º Los Teleóstomos, o «peces óscos».

Los tetrápodos, o animales dotados de cuatro patas y que respiran mediante pulmones, constituyen cuatro clases. Los más simples son los Anfibios («doble vida») —por ejemplo, las ranas y los sapos—. Doble vida significa que, en su infancia inmadura (es decir, cuando son renacuajos), no tienen miembros y respiran por medio de branquias; luego, en el estado adulto, desarrollan cuatro miembros y pulmones. Los anfibios, al igual que los peces, depositan sus huevos en el agua.

La segunda clase son los Reptiles (del latín *reptilis*, «arrastrarse»). Éstos incluyen las serpientes, lagartos, caimanes y tortugas. Estos animales respiran por medio de pulmones desde su nacimiento, y depositan sus huevos (encerrados en una dura cáscara) en la tierra. Los reptiles más desarrollados tienen, en esencia, corazones con

cuatro cavidades, en tanto que el corazón de los anfibios tiene tres cavidades y el de los peces solamente dos.

Los últimos dos grupos de tetrápodos son las Aves (pájaros) y los Mamíferos (ídem). Todos poseen sangre caliente: es decir, sus cuerpos están dotados de sistemas para mantener una temperatura interna constante, independientemente de la temperatura exterior (dentro de límites razonables). Dado que la temperatura interna es generalmente más elevada que la exterior, estos animales precisan aislamiento térmico. Con este fin, los pájaros están dotados de plumas y los mamíferos de pelo, sirviendo esto, en ambos casos, para mantener una capa de aire aisladora cerca de la piel. Los pájaros depositan huevos como los reptiles. Los mamíferos, naturalmente, paren, sus pequeños ya «empollados» y los alimentan con la leche producida por las glándulas mamarias *(mammae* en latín).



Anfioxo, un primitivo cordado en forma de pez con notocordio.

En el siglo XIX, los zoólogos tuvieron noticia de un hecho tan curioso y sorprendente que rehusaron creer en él. Los australianos habían hallado una criatura, dotada de pelo y productora de leche (mediante unas glándulas mamarias que carecían de pezones) y que, no obstante, ¡ponía huevos! Incluso cuando los zoólogos hubieron contemplado especímenes del animal (por desgracia, muerto, ya que no es fácil mantenerlo vivo fuera de su hábitat natural), se inclinaron a considerarlo como un tosco fraude. La bestia era un animal anfibio, que se parecía bastante a un pato: tenía un pico parecido al de las aves y pies palmípedos. Eventualmente, el «ornitorrinco» tuvo que ser reconocido como un fenómeno genuino y, por tanto, como una nueva clase de mamífero. Otro mamífero ponedor de huevos, el equidna, ha sido hallado desde entonces en Australia y Nueva Guinea. No sólo es el hecho de poner huevos lo que relaciona a estos mamíferos estrechamente con los reptiles; además, tienen sólo imperfectamente caliente su sangre; en los días fríos, su temperatura interna puede alcanzar los 10º C.

Hoy día, los mamíferos se dividen en tres subclases. Los que ponen huevos forman la primera clase, los Prototerios (del griego «primeros animales»). El embrión en el huevo está realmente bien desarrollado en el momento en que éste es depositado, y no necesita ser empollado durante largo tiempo. La segunda subclase de mamíferos, los Metaterios. («animales medios»), incluyen las zarigüeyas y los canguros. Su infancia, aunque nacen vivos, transcurre de una forma muy poco desarrollada, y mueren en breve tiempo, a menos que consigan alcanzar la bolsa protectora de la madre y permanecer junto a los pezones mamarios hasta que están lo suficientemente fuertes como para ir de un lado a otro. Estos animales reciben el nombre de «marsupiales» (del latín *marsupium, l*a palabra latina para bolsa).

Por último, en la cúspide de la jerarquía de los mamíferos, llegamos a la subclase Euterios («verdaderos animales»). Su característica distintiva es la placenta, un tejido irrigado por la sangre que permite a la madre proporcionar al embrión los alimentos y el oxígeno y liberarle de sus residuos, de forma que puede desarrollar su cría durante un largo periodo de tiempo dentro de su propio cuerpo (nueve meses en el caso del ser humano; dos años, para los elefantes y las ballenas). Los Euterios se denominan generalmente «mamíferos placentarios».

Los mamíferos placentarios se dividen en una docena de órdenes, de los que son ejemplos los siguientes:

Insectívoros («comedores de insectos») — musarañas, topos, y otros.

Quirópteros («manos-alas») — murciélagos.

Carnívoros («comedores de carne») — la familia del gato, la del perro, comadrejas, osos, focas, etc., pero sin incluir al hombre.

Roedores («que roen») — ratones, ratas, conejos, ardillas, cobayas, castores, puerco espines, etc.
Desdentados («sin dientes») — los perezosos y armadillos, que han echado dentición, y los osos hormigueros, que no lo han hecho.
Artiodáctilos («dedos pares») — animales con cascos, que poseen un número par de dedos en cada pie, tal como los machos cabríos, las ovejas, las cabras, el cerdo, el ciervo, los antílopes, los camellos, las jirafas, etc.
Perisodáctilos («dedos impares») — caballos, asnos, cebras, rinocerontes y tapires.
Proboscidios («nariz larga») — los elefantes, por supuesto.
Odontocetos («cetáceos dentados») — el cachalote y otros con dientes.
Mistacocétidos («cetáceos con barbas») — la ballena propiamente dicha (ballena franca), la ballena azul y otras que filtran los pequeños animales marinos que les sirven de alimento a través de las barbas córneas que parecen como un inmenso bigote en el interior de la boca.
Primates («primero») — el hombre, los simios, los monos, y algunos otros seres, con los que el hombre puede comprobar se halla asociado, con gran sorpresa por su parte.
Los primates se caracterizan por el hecho de que las manos, y en ocasiones, los pies, están equipados para aprehender, con los pulgares opuestos y grandes dedos gordos del pie. Los dedos terminan en uñas aplanadas en lugar de garras afiladas o pezuñas. El cerebro tiene un tamaño superior al de las otras especies y el sentido de la vista es más importante que el del olfato. Existen muchos otros criterios anatómicos menos evidentes que éstos.
Los primates se dividen en nueve familias. Algunas tienen tan pocas características de primates, que es difícil considerarlas como tales, aunque así deben ser clasificadas. ¡Una de ellas es la familia de los Tupáyidos, que incluye las musarañas de los árboles, devoradoras de insectos! Luego, están los lemúridos —de vida nocturna, seres que viven en los árboles y poseen boca parecida a la de la zorra y la apariencia de una ardilla—. Éstos se hallan particularmente en Madagascar.
Las familias más próximas al hombre son, por supuesto, los monos y los simios. Existen tres familias de monos (la palabra posiblemente se deriva de la latina *homunculus,* que significa «hombre pequeño»).
Las dos familias de monos en América, conocidas como los «monos del Nuevo Mundo», son los Cébidos (por ejemplo, el mono lanudo) y los Calitrícidos (por ejemplo, el tití). La tercera, la familia del «Viejo Mundo», son los Cercopitécidos; éstos incluyen los diversos babuinos.
Todos los simios pertenecen a una familia, llamada Póngidos. Son oriundos del hemisferio Oriental. Sus diferencias más notables con respecto a los monos son, por supuesto, su mayor tamaño y el carecer de cola. Los simios se clasifican en cuatro tipos: el gibón, el más pequeño, velludo, mejor armado y más primitivo de la familia; el orangután, de mayor tamaño, aunque también morador de los árboles, al igual que el gibón; el gorila, con un tamaño superior al del hombre, que habita principalmente en el suelo y es oriundo de África; y el chimpancé, que también habita en África, tiene una estatura inferior a la del hombre y es el primate más inteligente, después del hombre mismo.
Y por lo que se refiere a nuestra propia familia, la de los Homínidos, ésta comprende hoy día únicamente un solo género y, en realidad, una sola especie. Linneo la denominó *Homo sapiens* («el hombre sabio»), y hasta ahora nadie se ha atrevido a cambiar este nombre, a pesar de la provocación.

Evolución

Resulta casi imposible confeccionar la lista de los seres vivientes, tal como acabamos de hacer, sin finalizar con la poderosa impresión de que ha existido una lenta evolución de la vida desde la muy simple hasta la más compleja. Los tipos pueden ser dispuestos de forma que cada uno parece añadir algo al anterior.

Dentro de cada tipo, las distintas clases pueden ser clasificadas igualmente, y, dentro de cada clase, los órdenes.
Además, las especies a menudo parecen entremezclarse, como si estuvieran todavía evolucionando por caminos ligeramente separados, a partir de antepasados comunes, no muy lejanos en el tiempo. Algunas especies se hallan tan estrechamente relacionadas que, en especiales circunstancias, pueden entrecruzarse, como ocurre en el caso de la yegua y el asno, que, mediante la adecuada cooperación, pueden engendrar una mula. El ganado vacuno puede ser cruzado con los búfalos, y los leones, con los tigres. Existen también especies intermedias, por así decirlo, seres que enlazan entre sí dos grandes grupos de animales. El leopardo es un gato con determinadas características perrunas, y la hiena, un perro con ciertos rasgos felinos. El platipo es un mamífero que parece haberse quedado a mitad del camino en su evolución desde los reptiles. Existe un ser llamado peripato, que parece medio gusano, medio ciempiés. Las líneas divisorias se vuelven particularmente tenues cuando se consideran ciertos animales en sus estadios más jóvenes. La cría de la rana, o renacuajo, se parece a un pez, y existe un cordado primitivo llamado balanogloso, descubierto en 1825, que en su estadio inicial es tan parecido a una cría de equinodermo que al principio fue clasificada como tal.
Podemos seguir prácticamente la evolución a través de los tipos, incluso en el desarrollo de un ser humano a partir del huevo fertilizado. El estudio de este desarrollo («embriología») comenzó, en la moderna acepción de la palabra, con Harvey, el descubridor de la circulación de la sangre. En 1759, el fisiólogo alemán Kaspar Friedrich Wolff demostró que el cambio en el interior del huevo era realmente una evolución. Es decir, que crecían tejidos especializados a partir de precursores no especializados mediante una alteración progresiva, en lugar de hacerlo (tal como anteriormente se había supuesto) a través de un simple crecimiento de las tenues estructuras ya especializadas que existían en el huevo para empezar.
En el curso de esta evolución, el huevo empieza como una célula única (una clase de protozoo), posteriormente se transforma en una pequeña colonia de células (como en una esponja), cada una de las cuales, desde el principio, es capaz de separarse e iniciar la vida por su propia cuenta, al igual que ocurre cuando se desarrollan dos gemelos idénticos.
El embrión en desarrollo pasa a través de un estado de dos capas (como un celentérido), luego añade una tercera capa (como un equinodermo), y así continúa añadiendo complejidades en aproximadamente el mismo orden progresivo de las especies. El embrión humano tiene, en algún momento de su desarrollo, el notocordio de un cordado primitivo, más tarde agallas, que le dan una reminiscencia de pez, y aún más tarde, la cola y el vello del cuerpo de un mamífero inferior.
A partir de Aristóteles, muchos hombres especularon sobre la posibilidad de que los organismos hubieran evolucionado partiendo unos de otros. Pero, a medida que el Cristianismo aumentó su influencia, este tipo de especulaciones fueron condenadas. El capítulo primero del Génesis, en la Biblia, establecía claramente que todo ser viviente había sido creado «según su especie», y, tomado literalmente, esto significa que las especies eran «inmutables» y que debían haber tenido la misma forma desde el verdadero principio. Incluso Linneo, quien tenía que haberse sorprendido por las afinidades aparentes entre los seres vivientes, insistió con firmeza en la inmutabilidad de las especies.
La historia literal de la Creación, por muy profunda que estuviera arraigada en las mentes humanas, tuvo que sucumbir más tarde ante la evidencia de los «fósiles» (derivada de una palabra latina que significa «excavar»). Ya en 1669, el científico danés Nicolaus Steno había puesto de manifiesto que las capas inferiores («estratos») de las rocas tenían que ser más antiguas que los estratos superiores. Al considerar cualquier posible curso de la formación de la roca, resulta cada vez más evidente que los estratos inferiores tenían que ser *mucho más* antiguos que los superiores. Los restos petrificados de seres que vivieron en otros tiempos se hallaban a menudo tan profundamente incrustados bajo las capas de roca que tenían que ser muchísimo más antiguos que

los pocos miles de años que habían transcurrido desde la Creación, tal como se describe en la Biblia. Las pruebas fósiles también señalaron la existencia de enormes cambios ocurridos en la estructura de la Tierra. En una época tan antigua como el siglo VI a de J.C., el filósofo griego Jenófanes de Colofón había señalado la presencia de conchas marinas fósiles en las montañas y había supuesto que dichas montañas estuvieron bajo las aguas muchos siglos antes.

Los defensores de las palabras literales de la Biblia sostenían que el parecido de los fósiles con organismos vivientes en otro tiempo era sólo accidental, o bien que habían sido creados engañosamente por el diablo. Estas teorías resultaban totalmente inverosímiles; después se hizo una sugerencia más plausible respecto a que los fósiles eran restos de seres ahogados en el Diluvio. Las conchas marinas en las cumbres de las montañas realmente podrían ser la prueba de ello, ya que el relato bíblico del Diluvio dejaba bien sentado que el agua cubrió todas las montañas.

Pero, tras un examen más cuidadoso, muchos de estos organismos fósiles demostraron ser distintos de cualesquiera especies vivientes. John Ray, el primer clasificador, se preguntó si podrían representar a especies extintas. Un natura1ista suizo, llamado Charles Bonnet, fue más lejos. En 1770, sugirió que los fósiles eran realmente los restos de especies extinguidas que habían sido destruidas en antiguas catástrofes geológicas que se remontaban a mucho tiempo antes del Diluvio.

Sin embargo, fue un agrimensor ing1és, llamado William Smith, quien proporcionó una base científica para el estudio de los fósiles («paleontología»). Mientras trabajaba en unas excavaciones para abrir un canal en 1791, quedó impresionado por el hecho de que la roca a través de la que se estaba abriendo el canal se dividía realmente en estratos y que cada estrato contenía sus propios fósiles característicos. Ahora ya era posible clasificar los fósiles en un *orden* cronológico, según el lugar que ocuparan en la serie de capas sucesivas, y asociar, además, cada fósil con un tipo particular de estrato rocoso que representaría un determinado período en la historia geológica.

Aproximadamente en 1800, Cuvier (el hombre que inventó la noción de tipo) clasificó los fósiles según el sistema de Linneo y extendió la anatomía comparada hasta el pasado remoto. Aunque muchos fósiles representaban especies y géneros no hallados entre los seres vivientes, todas se acomodaban claramente a uno o a otro de los tipos conocidos y, así, entraban a formar parte integral del esquema de la vida. En 1801, por ejemplo, Cuvier estudió un fósil de dedos largos, de un tipo descubierto por vez primera veinte años antes, y demostró que correspondía a los restos de una especie voladora de alas coriáceas, que no existía en la actualidad —al menos que no existía *exactamente*—. Fue capaz de mostrar, a partir de la estructura ósea, que estos «pterodáctilos» («dedos en forma de alas»), tal como los llamó, eran reptiles, claramente emparentados con las serpientes, lagartos, cocodrilos y tortugas de hoy día.

Además, cuanto mayor era la profundidad del estrato en que se hallaba el fósil y mayor, por tanto, la antigüedad del mismo, más simple y menos desarrollado parecía éste. No sólo eso, sino que también, en ocasiones, algunos fósiles representaban formas intermedias que enlazaban dos grupos de seres, los cuales, tomando como referencia las formas vivientes, parecían completamente separadas. Un ejemplo particularmente sorprendente, descubierto después del tiempo de Cuvier, fue un pájaro muy primitivo llamado arqueoptérix (del griego *archaios*, antiguo y *ptéryx*, pájaro). Este animal, hoy día extinguido, tenía alas y plumas, ¡pero también poseía una cola de lagarto, adornada con plumas, y un pico que contenía dientes de reptil! En estos y otros aspectos resultaba evidente que establecía una especie de puente entre los reptiles y los pájaros.

Cuvier supuso también que las catástrofes terrestres, más que la evolución, habían sido las responsables de la desaparición de las formas de vida extinguidas, pero, en la década de 1830, la nueva teoría de Charles Lyell sobre los fósiles y la historia geológica, que ofreció en su histórico trabajo los *Principios de Geología*, liquidó completamente el «catastrofismo» (véase capítulo III).

Una teoría razonable sobre la evolución se convirtió en una

necesidad, si algún significado tenía que surgir de las pruebas paleontológicas.
Si los animales habían evolucionado de unas formas a otras, ¿qué era lo que les había obligado a hacerlo? Éste fue el escollo principal con que se tropezó en las tentativas efectuadas para explicar las variedades de la vida. El primero en intentar una explicación fue el naturalista francés Jean-Baptiste de Lamarck. En 1809, publicó un libro, titulado *Filosofía Zoológica*, en el que sugirió que el medio ambiente obligaba a los organismos a sufrir pequeños cambios, los cuales eran luego transmitidos a sus descendientes. Lamarck ilustró su idea con la jirafa (una sensación del momento, recientemente descubierta). Supuso que una criatura primitiva, parecida al antílope, que se alimentaba de las hojas de los árboles, habría agotado los alimentos fácilmente alcanzables, viéndose obligada a estirar su cuello tanto como podía para conseguir más comida. Debido al esfuerzo habitual de estirar el cuello, la lengua y las patas, gradualmente aumentó la longitud de estos apéndices. Luego habría transmitido estas características desarrolladas a sus hijos, los cuales, a su vez, debían de haberse estirado más y transmitido a su vez un cuello aún más largo a sus descendientes; y así sucesivamente. Poco a poco, generación tras generación de esfuerzos encaminados a aumentar la longitud del cuello, el primitivo antílope habría evolucionado hasta la actual jirafa.
La idea de Lamarck sobre la «herencia de los caracteres adquiridos» tropezó rápidamente con dificultades.
¿Cómo se había desarrollado en la jirafa, por ejemplo, su piel manchada? Seguramente ninguna acción por su parte, deliberada o involuntaria, podría haber producido este cambio. Además, un experimentador escéptico, el biólogo alemán August Friedrich Leopold Weismann, cortó las colas de un grupo de ratones durante varias generaciones e informó que la última generación mostraba unas colas no inferiores en tamaño a las de la primera. (Pudo haberse ahorrado este esfuerzo considerando el ejemplo representado por la circuncisión de los varones judíos, los cuales, después de un millar de generaciones, no han conseguido producir ninguna disminución de tamaño en el prepucio.)


Archaeopterix.

En 1883, Weismann había observado que las células germen, que eventualmente habrían de originar el espermatozoide o el huevo, se separaban del resto del embrión en un estadio precoz y permanecían relativamente no especializadas. A partir de esto, y de sus experimentos con las colas de las ratas. Weismann dedujo la teoría de la «continuidad del plasma germinal». En su opinión, el plasma germinal (es decir, el protoplasma que forma las células germinales) poseía una existencia continua a través de las generaciones, independientemente del resto del organismo, aunque tenía en éste un habitáculo temporal, por así decirlo, que se construía y destruía en cada generación.
El plasma germinal gobernaba las características del cuerpo, pero no era afectado por éste. En su exposición, aparecía como el extremo opuesto de Lamarck, y se equivocaba también, aunque, considerada en conjunto, la situación real se asemeja más estrechamente al punto de vista de Welsmann que al de Lamarck.
A pesar de ser rechazado por la mayor parte de los biólogos, el lamarckismo subsistió hasta el siglo XX, e incluso tuvo una poderosa, aunque en apariencia temporal, resurrección en la forma del lysenkoísmo (modificación hereditaria de las plantas mediante ciertos tratamientos) en la Unión Soviética. (Trofim Denisovich

Lysenko, el autor de esta teoría, fue poderoso en la época de Stalin, retuvo parte de su influencia durante el gobierno de Kruschev y al fin cayó en desgracia cuando Kruschev fue apartado del poder en 1964.) Los geneticistas modernos no excluyen la posibilidad de que la acción del medio ambiente pueda dar lugar a ciertos cambios transmisibles en los organismos simples, pero la idea de Lamarck, como tal, fue destruida por el descubrimiento de los genes y de las leyes de la herencia.

En 1831, un joven inglés llamado Charles Darwin, un diletante y deportista que había vivido una juventud un tanto desocupada y que buscaba con insistencia alguna cosa que le permitiera vencer su aburrimiento, fue persuadido por un capitán de barco y un profesor de Cambridge para que embarcara como naturalista en un buque, dispuesto para un viaje alrededor del mundo con una duración de cinco años. La expedición tenía como objetivo estudiar los litorales continentales y realizar observaciones sobre la flora y la fauna durante el trayecto. Darwin, que contaba entonces 22 años de edad, realizó a bordo del *Beagle* el más importante viaje por mar de la historia de la ciencia.

Mientras el barco navegaba lentamente a lo largo de la costa este de Sudamérica y luego remontándola por la costa oeste. Darwin fue recopilando cuidadosamente toda clase de información sobre las diversas formas de vida vegetal y animal. Su descubrimiento más sorprendente tuvo lugar en un grupo de islas del Pacífico, aproximadamente unas 650 millas al este del Ecuador, llamada islas Galápagos, debido a las tortugas gigantes que vivían en ellas (galápagos procede de la palabra española tortuga). Lo que más atrajo la atención del joven Darwin durante sus cinco semanas de estancia en las islas fue la diversidad de pinzones que había en ellas; éstos se conocen en la actualidad como «los pinzones de Darwin». Halló que los pájaros se dividían en al menos unas catorce especies diferentes, distinguiéndose unas de otras principalmente por las diferencias en la forma y tamaño de sus picos. Estas especies particulares no existían en ningún otro lugar del mundo, pero se parecían a un pariente evidentemente cercano del continente sudamericano. ¿Qué era lo que motivaba el carácter de los pinzones en estas islas? ¿Por qué se diferenciaban de los pinzones ordinarios, y por qué se dividían en no menos de catorce especies? Darwin decidió que la teoría más razonable al respecto era que todas ellas descendían de un tipo principal de pinzón y que se habrían ido diferenciando durante el largo período de aislamiento soportado en el archipiélago. La diferenciación se habría producido como resultado de la variación de los métodos de obtención de los alimentos.

Tres de las especies de pinzones comían todavía semillas, al igual que la especie continental, pero cada una comía una clase distinta de semillas y variaba, por tanto, en su tamaño, existiendo una especie más grande, otra mediana y una tercera más pequeña. Otras dos especies se alimentaban de cactos; la mayor parte de las restantes comían insectos.

El problema de los cambios ocurridos en las costumbres alimentarias y las características físicas de los pinzones preocupó la mente de Darwin durante varios años. En 1838 empezó a vislumbrar un atisbo de respuesta al leer un libro que había sido publicado cuarenta años antes por un clérigo inglés llamado Thomas Roben Malthus. Se titulaba *Un ensayo sobre el principio de la Población;* en él, Malthus sostenía que la población crece siempre en una proporción mayor que su provisión de alimentos, de forma que finalmente el hombre, una epidemia o la guerra la diezmaban. Fue en este libro donde Darwin tropezó con la frase «la lucha por la existencia», que sus teorías convirtieron en famosa más tarde. Recordando los pinzones, Darwin comprendió de pronto que la lucha por los alimentos podía actuar como un mecanismo que favorecía a los individuos más eficientes. Cuando los pinzones que habían colonizado las Galápagos se hubieran multiplicado hasta el punto de sobrepasar la provisión de semillas, únicamente los pájaros más fuertes, o aquellos particularmente adaptados para conseguir semillas, o también los que habían sido capaces de obtener nuevas formas de alimentos, pudieron sobrevivir. Un pájaro que casualmente estuviera dotado de pequeñas variaciones de las características del pinzón, variaciones que le permitieran comer semillas más grandes o más duras, o,

mejor aún, insectos, dispondría de un medio de subsistencia ilimitado. Un pájaro con un pico ligeramente más delgado o más largo podría conseguir alimentos que no estaban al alcance de los demás, o uno que tuviera un pico anormalmente grande podría disponer de alimentos insólitos. Tales pájaros, y sus descendientes, se multiplicarían a expensas de la variedad original de pinzones. Cada uno de los tipos adaptados hallaría y ocupada un nuevo hábitat, no ocupado, en el medio ambiente. En las islas Galápagos, virtualmente libres de vida ornitológica al comienzo, estaban disponibles toda clase de habitáculos y no existían competidores que estorbaran el camino. En el continente sudamericano, con todos los lugares ocupados, el pinzón antepasado sólo habría podido dedicarse a mantener su estatus. No daría lugar a nuevas especies.

Darwin sugirió que cada generación de animales estaba constituida por una serie de individuos que variaban, en ocasiones, del promedio. Algunos podrían ser ligeramente mayores; otros poseerían órganos de un tamaño ligeramente alterado; algunas de estas modificaciones representarían sólo una proporción sin importancia por encima o por debajo de la normalidad. Las diferencias podían ser efectivamente mínimas, pero aquellos cuyas estructuras estaban ligeramente mejor adaptadas al medio ambiente tenderían a vivir un poco más de tiempo y a tener una mayor descendencia. Eventualmente, a una acumulación de características favorables podría añadirse una incapacidad para aparearse con el tipo original, o con otras variedades de éste, y así nacería una nueva especie.

Darwin denominó a este proceso «selección natural».

Según su teoría, la jirafa había conseguido su largo cuello, no por un proceso de alargamiento, sino debido a que algunas jirafas habían nacido con cuellos más largos que sus compañeras, y, cuanto más largo fuera el cuello, mayor era la posibilidad del animal para conseguir alimento.

Por selección natural, las especies con cuello largo habrían triunfado. La selección natural explicaba también la piel manchada de la jirafa de un modo bastante sencillo: un animal con manchas en su piel podría disimular se mejor contra la vegetación multicolor, y de este modo tendría más posibilidades de escapar a la atención del león al acecho.

La teoría de Darwin acerca del modo como las especies se habían formado explicó también por qué a menudo resultaba tan difícil establecer unas distinciones claras entre las especies o entre los géneros. La evolución de las especies es un proceso continuo y, por supuesto, necesita un período de tiempo muy prolongado. Por fuerza, deben existir algunas especies en las que algunos miembros están, incluso en la actualidad, derivando lentamente en especies separadas.

Darwin empleó muchos años en recoger las pruebas y elaborar su teoría. Se percató de que ésta haría temblar las bases de la biología y del pensamiento humano acerca del lugar que el hombre ocupaba en el esquema de los seres, y esperó a estar seguro de su fundamento en todos los aspectos posibles. Darwin empezó a recoger notas sobre el tema y a meditar sobre él en 1834, incluso antes de leer a Malthus, y, en 1858, estaba todavía trabajando en un libro que trataba sobre el tema. Sus amigos (incluyendo a Lyell, el geólogo) conocían lo que estaba elaborando; varios habían leído ya sus notas preliminares. Le urgían a apresurase, por temor a que alguien se le anticipara. Pero Darwin no se apresuró (o no pudo), y sucedió lo que temían.

El hombre que se le anticipó fue Alfred Russel Wallace, catorce años más joven que Darwin. La vida de Wallace discurrió de modo muy parecido a la de Darwin. En su juventud formó parte también de una expedición científica alrededor del mundo. En las Indias Orientales, observó que las plantas y los animales de las islas situados más al Este eran completamente distintos de los de las islas occidentales. Podía establecerse una línea divisoria entre los dos tipos de formas vivientes; esta línea discurría entre Borneo y las Célebes, por ejemplo, y entre las pequeñas islas de Bali y Lombok, más allá, hacia el Sur. La línea se conoce todavía con el nombre de «línea de Wallace».

(Posteriormente, Wallace llegó a dividir la Tierra en seis grandes regiones, caracterizadas por distintas variedades de animales, una

división que, con pequeñas modificaciones, es todavía considerada válida.) Ahora bien, los mamíferos de las islas más orientales y de Australia eran claramente más primitivos que los de las islas occidentales y Asia, y, en realidad, que los del resto del mundo. Parecía como si Australia y las islas orientales se hubieran separado de Asia en alguna época remota de la Historia, cuando sólo existían mamíferos primitivos, y que los mamíferos placentarios únicamente se hubieran desarrollado más tarde en Asia. Nueva Zelanda debía de haber quedado aislada incluso durante más tiempo, ya que carecía en absoluto de mamíferos y estaba habitada por pájaros primitivos sin alas, de los cuales el superviviente más conocido hoy día es el kiwi.

Pero, ¿cómo habían surgido en Asia los mamíferos más evolucionados? Wallace comenzó a intentar descifrarlo en 1855, y en 1858, también él, leyó el libro de Malthus, y a partir de él dedujo, asimismo, idénticas conclusiones a que había llegado Darwin. Pero Wallace no empleó veinticuatro años en escribir sus conclusiones. Una vez la idea estuvo clara en su mente, se sentó y escribió un artículo sobre el tema en un par de días. Wallace decidió enviar sus manuscritos a algún competente biólogo reconocido, para su crítica y revisión, y eligió a Charles Darwin. Cuando Darwin recibió el manuscrito, quedó atónito. Expresaba sus propias ideas casi en sus mismos términos. Inmediatamente remitió el artículo de Wallace a otros científicos importantes y se ofreció a colaborar con Wallace en los posibles informes, reuniendo sus conclusiones. Las comunicaciones de ambos aparecieron en el *Diario de la Sociedad Lineana*, en 1858.

Al año siguiente, el libro de Darwin se publicó finalmente. Su título completo es *Sobre el Origen de las Especies por Medio de la Selección Natural*, o *la Supervivencia de las Razas Favorecidas en la Lucha por la Vida*. Nosotros lo conocemos simplemente como *El Origen de las Especies*.

La teoría de la evolución ha sido modificada y perfeccionada desde la época de Darwin, gracias al conocimiento del mecanismo de la herencia, de los genes y de las mutaciones (véase capítulo XII). No fue hasta 1930, realmente, cuando el estadístico y geneticista inglés Ronald Aylmer Fisher tuvo éxito en la demostración de que los genes mendelianos proporcionaban el mecanismo necesario para la evolución basada en la selección natural. Solamente entonces consiguió la teoría de la evolución su forma moderna. No obstante, la concepción básica de Darwin sobre la evolución por medio de la selección natural ha permanecido firme, y realmente la idea evolutiva se ha extendido a todos los campos de la ciencia, tanto física como biológica y social.

Naturalmente, la publicación de la teoría darviniana, desencadenó una tormenta. Al principio, un cierto número de científicos se mostró contrario a la idea. El más importante de ellos fue el zoólogo inglés Richard Owen, quien representaba el papel de sucesor de Cuvier como experto en fósiles y su clasificación. Owen descendió a ni veles más bien indignos en su lucha contra el darwinismo. No solamente empujaba a los demás a la contienda, mientras él permanecía en la oscuridad, sino que incluso escribió de forma anónima en contra de la teoría, citándose a sí mismo como una autoridad en la materia. El naturalista inglés Philip Henry Gosse intentó soslayar el dilema, sugiriendo que la Tierra había sido creada por Dios completa, incluyendo los fósiles, para probar la fe del hombre. Para la mayoría de la gente, no obstante, la sugerencia de que Dios podía jugar estratagemas infantiles a la Humanidad parecía tener un cariz más blasfemo que cualquier cosa que Darwin hubiera afirmado.

Los contraataques decrecieron, la oposición dentro del mundo científico disminuyó gradualmente, y, dentro de la misma generación, casi desapareció. Sin embargo, los adversarios ajenos a la ciencia lucharon durante mucho más tiempo y con mayor denuedo. Los fundamentalistas (intérpretes literales de la Biblia) se sintieron ultrajados por la implicación de que el hombre podía ser un simple descendiente de un antepasado simiesco. Benjamin Disraeli (más tarde Primer Ministro de Gran Bretaña) creó una frase inmortal señalando con acidez: «La pregunta planteada hoy día a la sociedad es ésta: ¿es el hombre un mono o un angel? Yo me pongo de parte de los ángeles». Los eclesiásticos, uniéndose

para la defensa de los ángeles, se encargaron del ataque contra Darwin.
El propio Darwin no estaba preparado, por temperamento, para entrar violentamente en la controversia, pero tenía un bien dotado campeón en el eminente biólogo Thomas Henry Huxley. Como el «bulldog de Darwin», Huxley combatió incansablemente en las salas de conferencia de Inglaterra. Consiguió su más notable victoria, casi al comienzo de su lucha, en el famoso debate con Samuel Wilberforce, obispo de la iglesia anglicana, un matemático y un orador tan instruido y locuaz, que era conocido familiarmente con el nombre de *Sam el adulador*.
El obispo Wilberforce, después de haber conquistado aparentemente al auditorio, se volvió al fin a su solemne y serio adversario. Como el informe que había dado lugar al debate se refería a él, Wilberforce «solicitaba saber si era a través de su abuelo o de su abuela como (Huxley) pretendía descender de un mono».
Mientras el auditorio estallaba en carcajadas, Huxley se levantó lentamente y contestó: «Si, por tanto, se me hace la pregunta de si desearía tener más bien a un miserable como abuelo que a un hombre generosamente dotado por la Naturaleza y poseedor de grandes medios de influencia, y que sin embargo, emplea estas facultades e influencias con el mero fin de introducir el ridículo en una grave discusión científica, indudablemente afirmo mi preferencia por el mono.» La contestación de Huxley aparentemente no sólo replicó al abrumado Wilberforce, sino que también puso a los fundamentalistas a la defensiva. En realidad, resultaba tan evidente la victoria de la teoría darwiniana que, cuando Darwin murió, en 1882, fue enterrado, con general veneración, en la abadía de Westminster, donde reposan los grandes de Inglaterra. Además, la ciudad de Darwin, en el norte de Australia, fue llamada así en su honor. Otro importante defensor de las ideas evolucionistas fue el filósofo inglés Herbert Spencer, quien popularizó la expresión «la supervivencia del más apto» y también la palabra «evolución», término que el propio Darwin raramente utilizaba. Spencer intentó aplicar la teoría de la evolución al desarrollo de las sociedades humanas (se le considera como el fundador de la ciencia de la sociología). Sus argumentos, contrariamente a su intención, fueron mal utilizados con posterioridad para apoyar la guerra y el racismo.
La última batalla abierta contra la evolución tuvo lugar en 1925. Finalizó con la victoria de los antievolucionistas, pero con la pérdida de la guerra.
La legislatura de Tennessee había dictado una ley prohibiendo a los maestros de las escuelas estatales subvencionadas públicamente enseñar que el hombre había evolucionado a partir de las formas más bajas de vida. Para probar la inconstitucionalidad de la ley, algunos científicos y educadores persuadieron a un joven profesor de biología de una escuela de enseñanza media, John T. Scopes, dar su clase sobre el darvinismo. Scopes fue inmediatamente acusado de violar la ley y llevado a juicio en Dayton, Tennessee, el lugar donde enseñaba. El mundo entero prestó suma atención a este juicio. La población local y el juez estaban firmemente de parte de la antievolución. Wilham Jennings Bryali, el famoso orador, tres veces candidato fracasado para la presidencia, y destacado fundamentalista, actuaba como uno de los fiscales acusadores. Scopes tenía como defensores al notable criminalista Clarence Darrow y a otros abogados asociados.
El juicio fue, en su mayor parte, decepcionante, ya que el juez negaba el permiso para que la defensa llamara a los científicos al estrado con objeto de testificar sobre las pruebas de la teoría darviniana, y restringía el testimonio únicamente a la cuestión de si Scopes había o no enseñado esta teoría. Pero el asunto, no obstante, se planteó por fin en la sala, cuando Bryan, venciendo las protestas de sus compañeros acusadores, se sometió voluntariamente a un careo sobre la posición fundamentalista. Darrow demostró prontamente que Bryan estaba «in albis» acerca de los desarrollos modernos en la ciencia y que tenía únicamente un conocimiento estereotipado, de escuela dominical, sobre la religión y la Biblia.

Scopes fue hallado culpable y condenado a pagar 100 dólares. (Posteriormente la sentencia fue revocada por razones técnicas por el Tribunal Supremo de Tennessee.) Pero la posición fundamentalista (y el Estado de Tennessee) había aparecido con un aspecto tan ridículo a los ojos del mundo culto que los antievolucionistas no han presentado ninguna polémica seria desde entonces —al menos no lo han hecho a la clara luz del día—.

En realidad, si se precisaba alguna confirmación del darvinismo, podía acudirse a los ejemplos de selección natural que habían tenido lugar ante los mismos ojos de la Humanidad (ahora que la Humanidad sabe qué es lo que tiene que observar). Un ejemplo notable tuvo lugar en la tierra nativa de Darwin.

En Inglaterra, según parece, la polilla manchada existe en forma de dos variedades: una clara y otra oscura. En tiempos de Darwin, la variedad blanca era la que predominaba debido a que destacaba menos con la luz en la corteza de los árboles cubiertos de liquen que frecuentaba. Su «coloración protectora» la salvaba, con mayor frecuencia que a la variedad oscura claramente visible, de todos aquellos animales que se alimentaban de ella. Sin embargo, en la Inglaterra moderna, industrializada, el hollín ha ocultado la capa de liquen y ha oscurecido la corteza del árbol. En la actualidad, es la variedad oscura la que resulta menos visible contra la corteza y, por tanto, queda más protegida. Así pues, la variedad oscura es la que predomina hoy día —gracias a la acción de la selección natural.

El estudio de los fósiles ha permitido a los paleontólogos dividir la historia de la Tierra en una serie de «eras». Éstas fueron bosquejadas y bautizadas por diversos geólogos británicos del siglo XIX, incluyendo al propio Lyell, a Adam Sedgwick, y a Roderick Impey Murchison.

Las eras comienzan hace unos 500 ó 600 millones de años, con los primeros fósiles (cuando ya todos los tipos, excepto los cordados, estaban establecidos). Naturalmente, los primeros fósiles no representan la primera vida en la Tierra. En la mayor parte de los casos, son únicamente las partes duras de los seres las que se fosilizan, de forma que un registro fósil concreto consta sólo de aquellos animales que poseyeron conchas o huesos. Incluso las más simples y antiguas de tales especies estaban ya considerablemente desarrolladas y debía tener un largo respaldo evolutivo. Prueba de ello es que, en 1965, se descubrieron restos fosilizados de pequeñas criaturas semejantes a las almejas cuya antigüedad parecía rondar los setecientos veinte millones de años. Hoy día, los paleontólogos pueden hacerlo mucho mejor. Es lógico pensar que la vida unicelular, sumamente elemental, se remonte a fechas mucho más distantes que cualquier cosa con un caparazón; y por cierto se han descubierto sobre algunas rocas diversas algas verdiazules y bacterias cuya antigüedad se cifra en miles de millones de años por lo menos. Allá por 1965, el paleontólogo americano Elso Sterrenberg Barghoorn descubrió en unas rocas diminutos objetos bacteriformes («microfósiles») cuya antigüedad rebasa los tres mil millones de años. Son tan minúsculos que el examen de su estructura requiere el microscopio electrónico.

Podría parecer, pues, que la evolución química moviéndose hacia el origen de la vida, se inició casi tan pronto como la Tierra adquirió su forma actual, es decir, hace cuatro mil seiscientos millones de años. Transcurridos mil quinientos millones de años, la evolución química había alcanzado ya una fase donde se formaban sistemas suficientemente complicados para recibir el calificativo de vivientes. Es posible que las algas verdiazules existieran hace dos mil quinientos millones de años, y entonces el proceso de fotosíntesis suscitaría la lenta transición desde una atmósfera de nitrógeno-anhídrido carbónico, a otra de nitrógeno-oxígeno. Mil millones de años atrás aproximadamente, la vida unicelular de los mares debe haber sido muy diferente, incluyendo los protozoos que sin duda habrán tenido las formas más complicadas de vida entre las existentes entonces... ¡los monarcas del mundo!

Durante los dos mil millones de años transcurridos desde la llegada al mundo de las algas verdiazules, el contenido de oxígeno debe haberse incrementado, aunque muy lentamente. Cuando

empezó a desarrollarse la historia terrestre en los dos últimos miles de millones de años, la concentración de oxígeno debe haber representado el 1 ó 2 % de la atmósfera. Lo suficiente para crear un rico manantial de energía destinada a las células animales, algo jamás existente en épocas anteriores. El cambio evolutivo se orientó hacia una complejidad creciente, y, por tanto, cabe suponer que hace seiscientos millones de anos pudo comenzar la abundante fosilización de organismos complejos. Las rocas más primitivas con fósiles complejos pertenecen, según se ha dicho, al período Cámbrico, y hasta fechas muy recientes se desestimó la historia completa de nuestro planeta que le precedió en sus cuatro mil millones de años, dándosele el título menospreciativo de «período Precámbrico». Ahora, una vez descubiertos los rastros inconfundibles de vida, se emplea el nombre más apropiado de «eón criptozoico» (expresión griega que significa «vida oculta»), mientras que los últimos millones de años constituyen el «eón-fanerozoico» («vida visible»).

El «eón criptozoico» se divide incluso en dos secciones: la primera, «era arqueozoica» («vida antigua»), contiene las primeras huellas de vida unicelular; la segunda se denomina «era proterozoica» («vida anterior»).

La divisoria entre los eones «criptozoico» y «fanerozoico, es sumamente tajante. En un instante del tiempo, por así decirlo, no hay ni un solo fósil más allá del nivel microscópico, y al momento siguiente surgen organismos complejos con una docena de tipos básicos bien diferenciados. Se ha llamado «disconformidad» a esa división rotunda, y la disconformidad conduce invariablemente a especulaciones sobre posibles catástrofes. Se diría que la aparición de fósiles debería haber sido más gradual; puede haber ocurrido que algunos acontecimientos geológicos de extrema rigurosidad barrieran los primeros antecedentes.

En 1967, Walter S. Olson formuló una sugerencia muy interesante, aunque considerablemente especulativa. Este científico opinó que hace mil millones de años, o quizás algo menos, la Tierra capturó a nuestra Luna y que con anterioridad a ello no tenía satélite alguno. (Los astrónomos consideran seriamente tal posibilidad como un medio para explicar ciertas anomalías del sistema Tierra-Luna.) Cuando sucedió dicha captura, la Luna estaba bastante más próxima que ahora. Las enormes mareas desatadas súbitamente quebrantarían los estratos rocosos superficiales de la Tierra y borrarían, por así decirlo, los antecedentes de fósiles; éstos no reaparecieron (y entonces aparentemente bien desarrollados) hasta que las poderosas mareas se replegaron hacia los puntos donde la superficie rocosa había quedado relativamente incólume.

Las amplias divisiones del fanerozoico son el Paleozoico («vida antigua» en griego), el Mesozoico («vida media») y el Cenozoico («nueva vida»). Según los modernos métodos utilizados para establecer la cronología geológica, el Paleozoico abarcó un período de quizá trescientos cincuenta millones de años, el Mesozoico ciento cincuenta millones, y el Cenozoico, los últimos cincuenta millones de años de la historia de la Tierra.

Cada era se subdivide a su vez en períodos. El Paleozoico empieza con el período Cámbrico (llamado así por un lugar en Gales —en realidad, por el nombre de una antigua tribu que lo habitaba—, donde estos estratos fueron descubiertos por vez primera). Durante el período Cámbrico, los mariscos fueron las formas de vida más evolucionadas. Ésta fue la era de los «trilobites», los artrópodos primitivos de los que el moderno límulo es el pariente viviente más próximo. El límulo, debido a que ha sobrevivido con pocos cambios evolutivos a través de largas edades, es un ejemplo de lo que en ocasiones se llama, más bien dramáticamente, un «fósil viviente». Debido a que el Cámbrico es el primero de los períodos ricos en fósiles, los dilatados eones que le precedieron, con las rocas realmente tan primitivas que ofrecen pocos o ningún registro fósil, son generalmente denominados el «Precambrico.» El siguiente período es el Ordovicense (denominado así también por otra tribu galesa). Éste fue el período, hace de unos cuatrocientos a quinientos millones de años, en el que los cordados hicieron su aparición en la forma de los «graptolites», pequeños animales que vivían en colonias y que hoy día están extinguidos. Posiblemente están relacionados con los «balonoglosos», que, al igual que los

graptolites, pertenecen a los «hemicordados», el más primitivo subtipo del tipo cordados.

Luego vino el Silúrico (llamado así también a causa de otra tribu de Gales) y el Devónico (a partir de Devonshire). El período Devónico, hace de unos trescientos a cuatrocientos millones de años, fue testigo del acceso de los peces a la supremacía del océano, una posición que se mantiene todavía hoy. No obstante, en este período tuvo lugar también la colonización de la tierra firme por las formas vivientes. Es duro comprobar, pero es cierto que, durante quizá las tres cuartas partes o más de nuestra historia la vida quedó limitada tan sólo a las aguas y la tierra permaneció muerta y estéril. Considerando las dificultades representadas por la carencia de agua, por las variaciones extremas de la temperatura y por la fuerza integral de la gravedad, no mitigada por la flotabilidad del agua, debe comprenderse que la propagación a la tierra de las formas vivas que estaban adaptadas a las condiciones del océano representó la mayor victoria singular conseguida por la vida sobre el mundo inanimado.

La emigración hacia la tierra probablemente empezó cuando la lucha por los alimentos en el océano superpoblado empujó a algunos organismos hacia las aguas poco profundas de la marea, hasta entonces desocupada debido a que el suelo quedaba expuesto al aire durante horas, en el momento de la marea baja. A medida que más y más especies se fueron apiñando en las playas, sólo podía conseguirse algún alivio en la contienda desplazándose cada vez más hacia la tierra, hasta que al fin algunos organismos mutantes fueron capaces de establecerse en la tierra seca.

Las primeras formas vivas en conseguir esta transición fueron las plantas. Esto tuvo lugar aproximadamente hace unos cuatrocientos millones de años. De entre ellas, las pioneras pertenecían al grupo vegetal actualmente extinguido llamado «psilofitales» —las primeras plantas multicelulares—. (El nombre procede de la palabra griega para significar «desnudo», porque los tallos estaban desnudos de hojas, signo éste de la primitiva naturaleza de dichas plantas.) Con el tiempo, fueron desarrollándose plantas más complejas y, hace trescientos cincuenta millones de años, la tierra se cubrió finalmente de bosques. Una vez la vida vegetal hubo empezado a crecer sobre la tierra firme, la vida animal pudo a continuación efectuar su propia adaptación. En unos pocos millones de años, la tierra firme fue ocupada por los artrópodos, ya que los animales de gran tamaño, carentes de un esqueleto interno, habrían sido aplastados por la fuerza de la gravedad. En el océano, por supuesto, la flotabilidad anulaba en gran parte a la gravedad, por lo que ésta no representaba un factor negativo. (Incluso hoy día los mayores animales viven en el mar.) Las primeras criaturas terrestres en conseguir una gran movilidad fueron los insectos; gracias al desarrollo de sus alas, fueron capaces de contrarrestar la fuerza de la gravedad. Que obligaba a los otros animales a arrastrarse lentamente. Por último, cien millones de años después de la primera invasión de la tierra firme, tuvo lugar una nueva invasión de seres vivientes que podían permitirse el lujo de ser voluminosos a pesar de la existencia de la gravedad, porque poseían un esqueleto óseo en su interior. Los nuevos colonizadores procedentes del mar eran peces óseos que pertenecían a la subclase Crosopterigios («aletas pedunculadas»). Algunos de sus compañeros habían emigrado a las profundidades marinas no pobladas; entre ellos estaba el celacanto, el cual los biólogos hallaron en 1939, con gran sorpresa.

La invasión de la tierra firme por los peces comenzó como resultado de la pugna para arrebatar el oxígeno en las extensiones de agua salobre. Entonces la atmósfera contenía oxígeno respirable en cantidades ilimitadas, y, por consiguiente, los peces mejor dotados para sobrevivir eran aquellos capaces de aspirar grandes bocanadas de aire cuando el agua contenía un porcentaje de oxígeno inferior al punto de supervivencia. Los dispositivos orgánicos para almacenar esas bocanadas tenían un valor incalculable, y el pez desarrolló unas bolsas en las vías alimentarias donde podía conservar el aire aspirado. Las bolsas de algunos individuos evolucionaron hasta formar sencillos pulmones. Entre los descendientes de ese pez primitivo figura el «pez pulmón», algunas de cuyas especies existen todavía en África y Australia. Estos animales viven en aguas estancadas

donde se asfixiaría cualquier pez ordinario, e incluso sobreviven a las sequías estivales cuando su hábitat se deseca. Hasta los peces cuyo elemento natural es el agua marina, donde el oxígeno no plantea problema alguno, evidencian todavía los rasgos heredados de aquellas criaturas primigenias provistas de pulmones, pues aún poseen bolsas llenas de aire, si bien éstas son simples flotadores y no órganos respiratorios.
Sin embargo, algunos peces poseedores de pulmones llevaron el asunto hasta su lógica culminación y empezaron a vivir totalmente fuera del agua durante períodos más o menos largos. Las especies crosopterigias, provistas de poderosas aletas, pudieron hacerlo con éxito, pues al faltarles la flotabilidad tuvieron que recurrir a sus propios medios para contrarrestar la fuerza de gravedad.
Hacia finales del Devónico, algunos de los primitivos crosopterigios pulmonados se encontraron a sí mismos en tierra firme, sosteniéndose de forma insegura sobre cuatro patas rudimentarias.
Tras el Devónico vino el Carbonífero («formación de carbón»), llamado así por Lyell debido a que éste fue el período de los enormes bosques pantanosos que, hace unos trescientos millones de años, representaron lo que quizás haya sido la vegetación más lujuriante de la historia de la Tierra; con el tiempo, estos bosques inmensos fueron sepultados y dieron lugar a los casi interminables yacimientos carboníferos del planeta. Éste fue el período de los anfibios; los crosopterigios, para entonces, estaban consumiendo sus completas vidas adultas sobre la tierra. A continuación vino el período Pérmico (llamado así por una región en los Urales, para estudiar la cual Murchison hizo un largo viaje desde Inglaterra). Los primeros reptiles hicieron su aparición en ese momento. Estos animales se extendieron en el Mesozoico, que se inició a continuación, y llegaron a dominar la Tierra tan por completo que este período se ha conocido con el nombre de la era de los reptiles.
El Mesozoico se divide en tres períodos: el Triásico (porque fue hallado en tres estratos), el Jurásico (a partir de los montes del Jura, en Francia), y el Cretáceo («formador de creta»). En el Triásico aparecieron los dinosaurios («lagartos terribles», en griego). Éstos alcanzaron su supremacía en el Cretáceo, cuando reinaba sobre la Tierra el *Tyrannosaurus rex*, el mayor animal carnívoro terrestre de la historia de nuestro planeta.
Fue durante el Jurásico cuando se desarrollaron los primeros mamíferos y pájaros, ambos a partir de un grupo separado de reptiles. Durante millones de años; estas especies permanecieron en la oscuridad. Sin embargo, a finales del Cretáceo, los gigantescos reptiles empezaron a desaparecer (debido a alguna razón desconocida, por lo que la causa de «el gran exterminio» sigue siendo uno de los problemas más atormentadores en Paleontología), y los mamíferos y los pájaros ocuparon su lugar.
El Cenozoico, que siguió a continuación, se convirtió en la era de los mamíferos; dio lugar a los mamíferos placentarios y al mundo que conocemos.
La unidad de la vida actual se demuestra, en parte, por el hecho de que todos los organismos están compuestos de proteínas creadas a partir de los mismos aminoácidos.
Igualmente, la misma clase de evidencia ha establecido recientemente nuestra unidad con el pasado. La nueva ciencia de la «Paleobioquímica» (la Bioquímica de las formas de vida antiguas) se inició a finales de la década de 1950, al demostrarse que algunos fósiles, de 300 millones de años de antigüedad, contenían restos de proteínas compuestas precisamente de los mismos aminoácidos que constituyen las proteínas hoy día: glicina, alanina, valina, leucina, ácido glutámico y ácido aspártico. Ninguno de los antiguos aminoácidos se diferenciaba de los actuales. Además, se localizaron restos de hidratos de carbono, celulosa, grasas y porfirinas, sin (nuevamente) nada que pudiera ser desconocido o improbable en la actualidad.
A partir de nuestro conocimiento de bioquímica podemos deducir algunos de los cambios bioquímicos que han desempeñado un papel en la evolución de los animales.
Consideremos la excreción de los productos de desecho nitrogenados. En apariencia, el modo más simple de librarse del nitrógeno es excretarlo en forma de una pequeña molécula de amoníaco (NH_3), la cual puede fácilmente pasar a través de las

membranas de la célula a la sangre. Da la casualidad que el amoníaco es sumamente tóxico. Si su concentración en la sangre excede de la proporción de una parte en un millón, el organismo perecerá. Para un animal marino, esto no representa un gran problema; puede descargar el amoníaco en el océano, continuamente, a través de sus agallas. Sin embargo, para un animal terrestre, la excreción de amoníaco es imposible. Para descargar el amoníaco con tanta rapidez como éste se forma, se precisaría una excreción de orina de tal magnitud que el animal quedaría pronto deshidratado y moriría. Por tanto, un organismo terrestre debe liberar sus productos de desecho nitrogenados en una forma menos tóxica que el amoníaco. La solución viene representada por la urea. Esta sustancia puede ser transportada en la sangre a concentraciones superiores al uno por mil, sin representar un serio peligro.

Ahora bien, el pez elimina los desechos nitrogenados en forma de amoníaco, y así lo hace también el renacuajo. Pero, cuando el renacuajo madura y se convierte en una rana, empieza a eliminarlos en forma de urea. Este cambio en la química del organismo es, en cada momento, tan crucial para la evolución desde la vida acuática a la vida terrestre, como lo son los cambios visibles de agallas a pulmones.

Este cambio bioquímico debió de haber tenido lugar cuando, los crosopterigios invadieron la tierra firme y se convirtieron en anfibios. Por este motivo, existen bases suficientes para creer que la evolución bioquímica tuvo un papel tan importante en el desarrollo de los organismos como la evolución «morfológica» (es decir los cambios en la forma y la estructura).

Otro cambio bioquímico fue necesario antes de que pudiera darse el gran paso de los anfibios a los reptiles. Si el embrión de un huevo de reptil excretara urea, ésta llegaría a elevarse hasta concentraciones tóxicas, en la limitada cantidad de agua existente en el huevo. El cambio que se cuidó de resolver este problema fue la formación de ácido úrico en lugar de urea. El ácido úrico (una molécula purínica que se parece a la de la adenina y la guanina, que existen en los ácidos nucleicos) es insoluble en el agua; por tanto, precipita en forma de pequeños gránulos y de este modo no puede penetrar en las células. Este cambio desde la excreción de urea a la de ácido úrico fue tan fundamental en el desarrollo de los reptiles como, por ejemplo, la evolución del corazón de tres cavidades al de cuatro cavidades.

En su vida adulta, los reptiles continúan eliminando los productos de desecho nitrogenados en forma de ácido úrico. No tienen orina en forma líquida. En lugar de ello, el ácido úrico se elimina como una masa semisólida a través de la misma abertura en el cuerpo que le sirve para la eliminación de las heces. Este orificio corporal recibe el nombre de «cloaca» (de la palabra latina para este término).

Los pájaros y los mamíferos ponedores de huevos, que depositan huevos del mismo tipo de los reptiles, mantienen el mecanismo del ácido úrico y la cloaca. De hecho, los mamíferos que ponen huevos se llaman a menudo «monotremas» (de las palabras griegas que significan «un agujero»).

Por otra parte, los mamíferos placentarios pueden expulsar fácilmente los productos de desecho nitrogenados del embrión, ya que éste se halla conectado indirectamente con el sistema circulatorio de la madre. Los embriones de los mamíferos, por tanto, no tienen problemas con la urea. Ésta es transferida al flujo sanguíneo materno y liberada más tarde a través de los riñones de la madre.

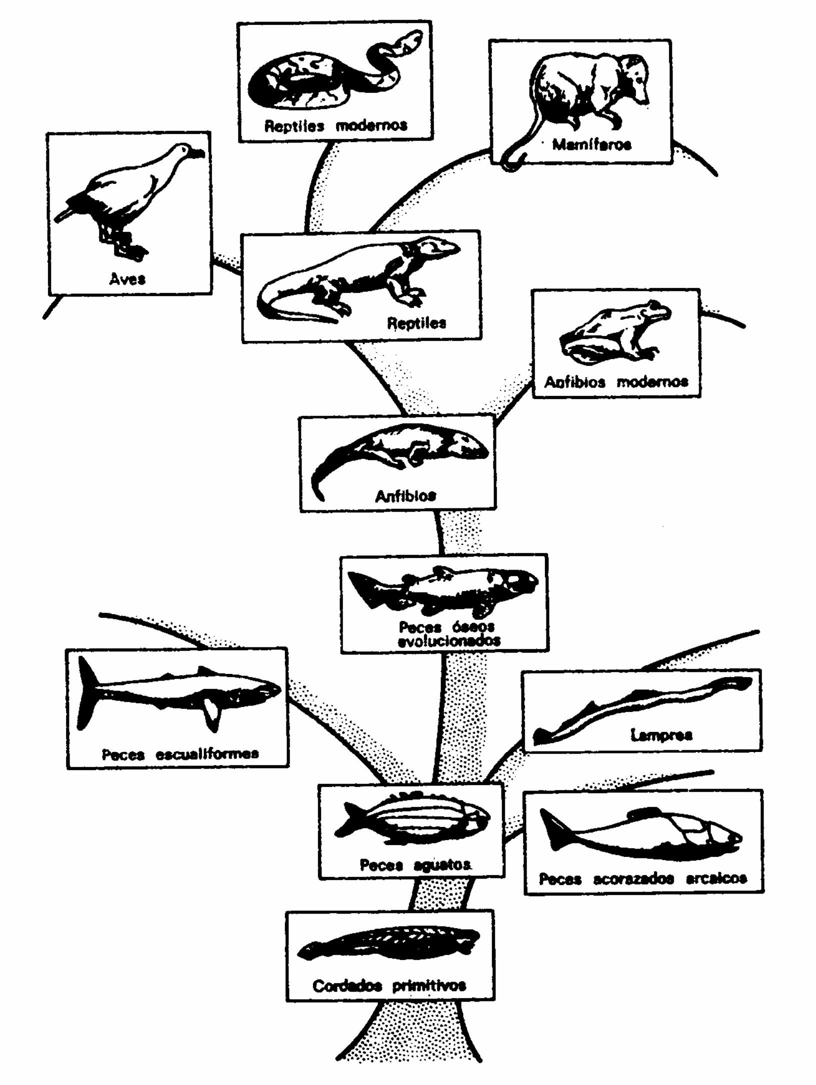
Un mamífero adulto tiene que excretar cantidades sustanciales de orina para desembarazarse de su urea. Esto exige la presencia de dos orificios separados: un ano para eliminar los residuos sólidos indigeribles de los alimentos y un orificio uretral para la orina líquida.

Los sistemas explicados de la eliminación de nitrógeno demuestran que, aunque la vida es básicamente una unidad, existen también pequeñas variaciones sistemáticas de una especie a otra. Además, estas variaciones parecen ser mayores a medida que la distancia evolutiva entre las especies es mayor.

Consideremos, por ejemplo, aquellos anticuerpos que pueden crearse en la sangre animal en respuesta a una proteína o proteínas

extrañas, como, por ejemplo, las existentes en la sangre humana. Estos «antisueros», si son aislados, reaccionarán poderosamente en la sangre humana, coagulándola, pero no reaccionarán de este modo con la sangre de otras especies. (Ésta es la base de las pruebas que indican que las manchas de sangre tienen un posible origen humano, lo que en ocasiones da un tono dramático a las investigaciones criminales.) De forma interesante, los antisueros que reaccionan con la sangre humana ofrecen una respuesta débil con la sangre del chimpancé, en tanto que los antisueros que reaccionan intensamente con la sangre de un pollo lo hacen de modo débil con la sangre de un pato, y así sucesivamente. Por tanto, la especificidad de los anticuerpos puede ser utilizada para indicar las estrechas relaciones entre los seres vivientes.

Estas pruebas indican, como era de esperar, la existencia de pequeñas diferencias en la compleja molécula de proteína; diferencias que son tan pequeñas en las especies muy afines que impiden la producción de algunas reacciones antiséricas.



Arbol filogenético, mostrando las lineas evolutivas de los vertebrados.

Cuando los bioquímicos consiguieron desarrollar técnicas para la determinación de la estructura exacta de los aminoácidos en las proteínas, en la década de 1950, este método de clasificar las

especies según su estructura proteínica fue considerablemente perfeccionado.

En 1965 se dio cuenta de estudios más minuciosos todavía sobre las moléculas hemoglobínicas de diversos primates, incluido el hombre. Una de las dos cadenas de péptidos en la hemoglobina, la llamada «cadena alfa», variaba poco de un primate a otro. La otra, la «cadena beta», señalaba importantes variaciones. Entre un primate determinado y el hombre había sólo seis puntos diferentes respecto a los aminoácidos y la cadena alfa, pero veintitrés por cuanto se refiere a las cadenas beta. Considerando las diferencias halladas en las moléculas hemoglobínicas, se pensó que el hombre había empezado a divergir de los demás simios hace setenta y cinco millones de años, más o menos el período de las primeras divergencias entre los caballos y los asnos ancestrales.

Todavía se observan distinciones más acentuadas cuando se comparan las moléculas del «citocromo C», una molécula proteínica que contiene hierro, compuesta por 105 aminoácidos y hallada en las células de toda especie consumidora de oxígeno —vegetal, animal o bacteria indistintamente—. Analizando las moléculas de citocromo C de diversas especies, se descubrió que la diferencia entre las moléculas del hombre y las del mono Rhesus estribaba solamente en un aminoácido a lo largo de toda la cadena. Entre el citocromo C del hombre y el del canguro había diez diferencias de aminoácidos; entre el del hombre y el del atún, veintiuna; entre el del hombre y una célula de fermento, cuarenta diferencias aproximadamente.

Con ayuda de computadoras, los bioquímicos realizaron análisis exhaustivos y llegaron a la conclusión de que el cambio en un aminoácido residual requería como promedio unos siete millones de años para consolidarse, y que se podía calcular aproximadamente las fechas de remoto pretérito en que un organismo concreto divergía de otro. Sería hace dos mil quinientos millones de años, a juzgar por el análisis del citocromo C, cuando los organismos superiores divergieron de la bacteria (es decir, en aquellas lejanas fechas vivía todavía una criatura a la cual podemos conceptuar como un antepasado común). Igualmente, las plantas y los animales tuvieron un antepasado común hace mil quinientos millones de años, y los vertebrados e insectos lo tuvieron hace mil millones de años.

Si las mutaciones de la cadena de ADN conducentes a cambios en el esquema de «aminoácidos» quedaran determinadas únicamente por los factores accidentales, cabría suponer que el ritmo de la evolución se atendría aproximadamente a una constante. Sin embargo, la evolución parece progresar con mayor rapidez en ciertas ocasiones..., y entonces se produce un súbito florecimiento de nuevas especies o una avalancha no menos súbita de muertes entre las más antiguas. Para ejemplificar este caso citemos las postrimerías del Cretáceo, cuando los dinosaurios, que vivían entonces juntamente con otros grupos de organismos, se extinguieron por completo en un período relativamente corto, mientras otros organismos proseguían viviendo sin sufrir perturbaciones. Posiblemente, el ritmo de las mutaciones es más vivo en ciertas épocas de la historia terrestre que en otras, y esas mutaciones más frecuentes promueven un número extraordinario de nuevas especies o anulan un número igualmente excepcional de las antiguas. (También pudiera ocurrir que las nuevas especies fueran más eficientes que las antiguas y compitieran con ellas hasta ocasionarles la muerte.) Un factor ambiental que estimula la producción de mutaciones es la radiación energética, e indudablemente la Tierra sufre un constante bombardeo de radiación energética procedente de todas direcciones y en todo tiempo. La atmósfera absorbe una gran parte de esa energía, pero ni la atmósfera siquiera es capaz de rechazar la radiación cósmica. Aquí cabe preguntarse si la radiación cósmica no será mayor en algún período determinado que en otros.

Se puede dar por supuesta una diferencia en cada uno de dos caminos distintos. El campo magnético terrestre desvía en cierta medida la radiación cósmica. Ahora bien, ese campo magnético tiene una intensidad variable y durante ciertos períodos, a intervalos cambiantes, desciende hasta la intensidad cero. En 1966, Bruce Heezen adujo que, cuando el campo magnético atraviesa una época de intensidad cero durante su proceso de

inversión, dichos períodos pueden representar el momento en que una cantidad insólita de radiación cósmica alcance la superficie terrestre y acelere súbitamente el ritmo de la mutación. Este pensamiento resulta inquietante si se considera el hecho de que la Tierra parece encaminarse hacia un período similar de intensidad cero.
Por otra parte, podríamos hacernos también algunas preguntas sobre esas supernovas presentes en la vecindad de la Tierra... es decir, lo bastante próximas al Sistema Solar para incrementar perceptiblemente el bombardeo de la superficie terrestre por los rayos cósmicos. Dos astrónomos americanos, K. D. Terry y Wallace H. Tucker, han formulado ciertas especulaciones sobre dicha posibilidad. Ellos se preguntan si no podría haber tenido lugar una combinación de ambos efectos con simultaneidad fortuita —el acercamiento de una supernova justamente cuando el campo magnético terrestre sufría un descenso temporal— que explicara la súbita muerte de los dinosaurios. Bien, quizá sea posible, pero hasta ahora no existen pruebas concluyentes.

El Origen Del Hombre

James Ussher, arzobispo irlandés del siglo XVII, determinaba la fecha exacta de la creación del hombre precisamente en el año 4004 a. de J.C.
Anteriormente a Darwin, pocos hombres se atrevieron a dudar de la interpretación bíblica de la historia antigua del hombre. La fecha más antigua, razonablemente concreta, a la que pueden referirse los acontecimientos relatados en la Biblia es el reinado de Saúl, el primer monarca de Israel, quien se cree que subió al trono aproximadamente en el año 1025 a. de J.C. El obispo Ussher y otros investigadores de la Biblia, que estudiaron el pasado a través de la cronología bíblica, llegaron a la conclusión de que tanto el hombre como el universo no podían tener una existencia superior a la de unos pocos miles de años.
La historia documentada del hombre, tal como está registrada por los historiadores griegos, se iniciaba sólo alrededor del año 700 a. de J.C, más allá de esta fecha clave de la historia, confusas tradiciones orales se remontaban hasta la guerra de Troya, aproximadamente en el año 1200 a. de J.C., y, más vagamente todavía, hasta una civilización prehelénica en la isla de Creta sometida al rey Minos.
A principios del siglo XIX, los arqueólogos empezaron a descubrir los primeros indicios de las civilizaciones humanas que existieron antes de los períodos descritos por los historiadores griegos y hebreos. En 1799, durante la invasión de Egipto por Napoleón Bonaparte, un oficial de su ejército, llamado Boussard, descubrió una piedra con inscripciones, en la ciudad de Roseta, en una de las bocas del Nilo. El bloque de basalto negro presentaba tres inscripciones diferentes: una en griego, otra en una forma antigua de escritura simbólica egipcia llamada «jeroglífico» («escritura sagrada») y otra en una forma simplificada de escritura egipcia llamada «demótico» («del pueblo»).
La inscripción en griego era un decreto rutinario del tiempo de Tolomeo V, fechado en el equivalente al 27 de marzo del año 196 a. de J.C. Forzosamente tenía que ser una traducción del mismo decreto que se ofrecía en las otras dos lenguas sobre la tabla (comparemos con las indicaciones de «no fumar» y otros avisos oficiales que a menudo aparecen hoy día escritos en tres idiomas, en los lugares públicos, especialmente en los aeropuertos). Los arqueólogos se mostraron entusiasmados: al menos tenían una «clave» con la que descifrar las escrituras egipcias anteriormente incomprensibles. Se llevó a cabo un trabajo bastante importante en el «desciframiento del código» por parte de Thomas Young, el hombre que había establecido por vez primera la teoría ondulatoria de la luz (véase capítulo VII), pero le tocó en suerte a un estudiante francés de antigüedades, Jean-François Champollion, resolver por completo la «piedra de Roseta». Aventuró la suposición de que el copto, una lengua todavía empleada por ciertas sectas cristianas en Egipto, podía ser utilizado como guía para descifrar el antiguo lenguaje egipcio. En 1821, había conseguido descifrar los jeroglíficos y la escritura

demótica, y abierto el camino para comprender todas las inscripciones halladas en las ruinas del antiguo Egipto.
Un hallazgo ulterior casi idéntico consiguió resolver el problema de la indescifrable escritura de la antigua Mesopotamia. En un elevado farallón, cerca del pueblo en ruinas de Behistun, al oeste del Irán, los científicos hallaron una inscripción que había sido grabada, aproximadamente en el 520 a. de J.C., por orden del emperador persa Darío I. Explicaba la forma en que éste había conseguido llegar al trono tras derrotar a un usurpador. Para estar seguro de que todo el mundo pudiera leerlo, Darío había mandado grabarla en tres idiomas: persa, sumerio y babilónico. Las escrituras sumerias y babilónicas, con una antigüedad que se remonta al año 3100 a. de J.C., estaban basadas en imágenes pictográficas, que se formaban haciendo muescas en la arcilla con un punzón; estas escrituras habían evolucionado hasta una de tipo «cuneiforme» («en forma de cuña»), que siguió utilizándose hasta el siglo I d. de J.C.
Un oficial del ejército inglés, Henry Creswicke Rawlinson, subió al farallón, copió la inscripción completa y, en 1846, después de diez años de trabajo, había conseguido realizar una traducción total, utilizando los dialectos locales como guía cuando los necesitaba. El desciframiento de las escrituras cuneiformes permitió leer la historia de las civilizaciones antiguas entre el Tigris y el Éufrates.
Se enviaron una expedición tras otra a Egipto y Mesopotamia en busca de más tablas y restos de las antiguas civilizaciones. En 1854, un científico turco, Hurmuzd Rassam, descubrió los restos de una biblioteca de tablas de arcilla en las ruinas de Nínive, la capital de la Antigua Asiria, una biblioteca que había sido compilada por el último gran rey asirio, Asurbanipal, aproximadamente en el 650 a. de J.C. En 1873, el investigador de la cultura asiria, el inglés George Smith, descubrió tablillas de arcilla que ofrecían relatos del bíblico Diluvio, lo cual demuestra la veracidad del libro del Génesis. En 1877, una expedición francesa al Irak descubrió los restos de una cultura que precedía a la babilónica: la anteriormente mencionada de los sumerios. Esto hacía remontar la historia de aquella región a los más antiguos tiempos egipcios.
Sin embargo, Egipto y Mesopotamia no estaban realmente al mismo nivel cultural que Grecia, cuando se produjeron los espectaculares hallazgos sobre los orígenes de la moderna cultura occidental. Quizás el momento más excitante en la historia de la arqueología ocurrió en 1873, cuando un antiguo dependiente de ultramarinos alemán halló la más famosa de todas las ciudades legendarias.
Heinrich Schliemann, desde niño, había desarrollado una verdadera obsesión por Homero. A pesar de que la mayor parte de los historiadores consideraban la *Ilíada* como un simple relato mitológico, Schliemann vivía y soñaba con la guerra de Troya. Decidió que tenía que hallar la ciudad de Troya, y, gracias a esfuerzos casi sobrehumanos, consiguió elevarse desde dependiente de ultramarinos a millonario, por lo que al fin pudo financiar la empresa.
En 1868, a los cuarenta y seis años de edad, se dio a conocer. Persuadió al Gobierno turco que le concediera permiso para excavar en el Asia Menor, y, siguiendo únicamente los escasos indicios geográficos aportados por los relatos de Homero, por fin sentó sus reales sobre un montículo cerca del pueblo de Hissarlik. Convenció a la población local para que le ayudara a excavar en el terraplén. Haciéndolo de un modo completamente aficionado, destructivo y sin un método científico, empezó a desenterrar una serie de antiguas ciudades sepultadas, cada una de ellas construida sobre las ruinas de la anterior. Y luego, hacia el final, surgió el éxito: desenterró Troya —o, al menos, una ciudad que él pretendía que era Troya—. Realmente, respecto a las ruinas particulares que él denominaba Troya, se sabe hoy día que son muchísimo más antiguas que la Troya de Homero, aunque, a pesar de todo, Schliemann había conseguido demostrar que los relatos de Homero no eran sólo simples leyendas.
Enormemente excitado por su triunfo, Schliemann se trasladó a territorio griego y empezó a excavar en las ruinas de Micenas, un poblado que Homero había descrito como la en otro tiempo

poderosa ciudad de Agamenón, la que había guiado a los griegos en la guerra de Troya.
De nuevo realizó un hallazgo sorprendente: las ruinas de una ciudad con gigantescas murallas, de la que hoy día se sabe que se remonta a 1.500 años a. de J.C.
Los éxitos de Schliemann impulsaron al arqueólogo británico Arthur John Evans a iniciar sus propias excavaciones en la isla de Creta, lugar descrito en las leyendas griegas como la sede de una poderosa civilización primitiva bajo el gobierno del rey Minos. Evans, explorando la isla en la década de 1800, descubrió una brillante, y profusamente ornamentada, civilización «minoica», que se extendía hacia el pasado muchos siglos antes del tiempo de la Grecia de Homero. Aquí también se hallaron tablillas escritas. Aparecían en dos clases de escritura diferentes; una de ellas, llamada «lineal B», fue finalmente descifrada en la década de 1950, demostrando ser una variante del griego, mediante una notable proeza de análisis criptográfico y lingüístico realizada por el joven arquitecto inglés Michael Vestris.
A medida que se descubrieron otras civilizaciones primitivas —los hititas y los mitanis, en el Asia Menor; la civilización hindú, en la India, etc.—, se hizo evidente que los hechos históricos registrados por Heródoto de Grecia y el Antiguo Testamento de los hebreos representaban estadios comparativamente avanzados de la civilización humana. Las ciudades más primitivas del hombre eran, al menos, miles de años más antiguas y la existencia prehistórica del ser humano en unas formas de vida menos civilizadas debían de extenderse muchos miles de años más allá hacia el pasado.
Los antropólogos hallaron que era conveniente dividir la historia cultural en tres grandes períodos: la Edad de Piedra, la Edad del Bronce y la Edad del Hierro (una división sugerida, por vez primera, por el poeta y filósofo romano Lucrecio, e introducida en la ciencia moderna por el paleontólogo danés C. J. Thomson, en 1834). Anteriormente a la Edad de Piedra, debió de haber existido una «Edad del Hueso», en la que los cuernos de animal afilados, los dientes en forma de escoplo y los fémures, utilizados como mazas, prestaron un servicio al hombre en un momento en que el pulimento de la relativamente intratable piedra no había sido aún perfeccionado.
Las Edades del Bronce y del Hierro son, por supuesto, muy recientes; tan pronto como nos sumergimos en el estudio de la época anterior a la historia escrita, nos encontramos ya en la Edad de Piedra. Lo que llamamos civilización (expresión procedente de la palabra latina para significar «ciudad») empezó quizás alrededor del año 6000 a. de J.C., cuando el hombre por vez primera se transformó de cazador en agricultor, aprendió a domesticar a los animales, inventó la alfarería y nuevos tipos de herramientas y empezó a desarrollar las comunidades permanentes y un sistema de vida más sedentario. Debido a que los restos arqueológicos que proceden de este período de transición están jalonados por la aparición de utensilios de piedra avanzados, construidos con nuevas formas, este período es conocido con el nombre de la Nueva Edad de Piedra, o período «Neolítico».
Esta revolución neolítica parece haberse iniciado en el próximo Oriente, en la encrucijada de los caminos de Europa, Asia *y* África (donde posteriormente se originaron también las Edades del Bronce y del Hierro). Al parecer, a partir de allí la revolución se difundió lentamente, en ondas expansivas, al resto del mundo. No alcanzó la Europa Occidental y la India hasta el año 3000 a. de J.C., el norte de Europa y el Asia Oriental hasta el 2000 a. de J.C., y el África Central y el Japón hasta quizás el año 1000 a. de J.C., o quizás incluso posteriormente. El África meridional y Australia permanecieron en el Paleolítico hasta los siglos XVIII y XIX. La mayor parte de América estaba también aún en la fase de comunidades cazadoras cuando los europeos llegaron en el siglo XVI, aunque una civilización bien desarrollada, posiblemente originada por los mayas, había florecido en América Central y el Perú en una época tan antigua como el siglo I de la Era Cristiana.
Las pruebas de la existencia de culturas humanas pre-neolíticas empezaron a salir a la luz en Europa a finales del siglo XVIII. En 1797, un inglés llamado John Frere descubrió en Suffolk, algunos útiles de pedernal toscamente fabricados, demasiado primitivos

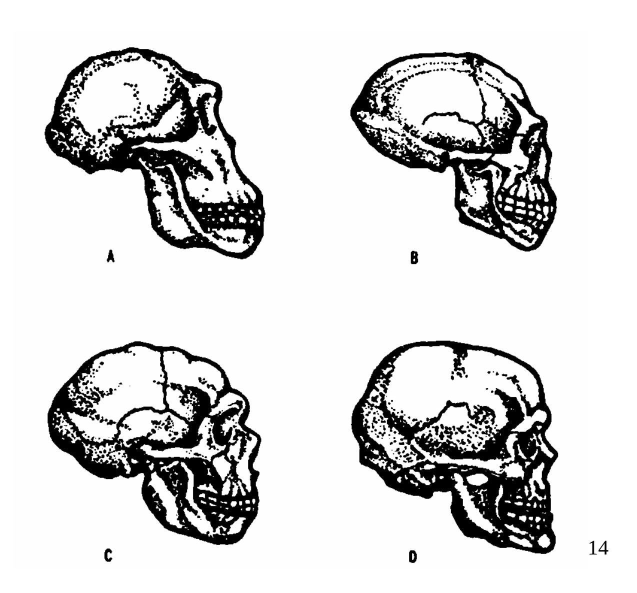
para haber sido realizados por el hombre neolítico. Se hallaron a una profundidad de cuatro metros bajo tierra, lo cual, según el índice normal de la sedimentación, demostraba su enorme antigüedad. Justamente con los instrumentos, en el mismo estrato se hallaron huesos de animales extinguidos. Se descubrieron nuevos signos de la gran antigüedad del hombre fabricante de utensilios, principalmente por dos arqueólogos franceses del siglo XIX, Jacques Boucher de Perthes y Édouard-Armand Lartet. Éste, por ejemplo, halló un diente de mamut sobre el que algún hombre primitivo había realizado un excelente dibujo de dicho animal, evidentemente partiendo de modelos vivientes. El mamut era una especie de elefante peludo, que desapareció de la Tierra justamente antes del comienzo de la Nueva Edad de Piedra.

Los arqueólogos se lanzaron a una activa búsqueda de primitivos instrumentos de piedra. Hallaron que éstos podían ser atribuidos a una relativamente corta Edad Media de Piedra («Mesolítico») y a una dilatada Edad Antigua de Piedra («Paleolítico»). El Paleolítico fue dividido en los períodos Inferior, Medio y Superior. Los objetos más antiguos que podían ser considerados verdaderos utensilios («eolitos», o «piedras de la aurora») ¡parecían remontarse a una época de cerca de un millón de años atrás!

¿Qué tipo de criatura había fabricado los utensilios de la edad Antigua de Piedra? Se decidió que el hombre paleolítico, al menos en sus últimos estadios, era bastante más que un animal cazador. En 1879, un aristócrata español, el marqués de Sautuola, exploró algunas cuevas que habían sido descubiertas unos pocos años antes —después de haber estado bloqueadas por los deslizamientos de rocas desde los tiempos prehistóricos— en Altamira, en el norte de España, cerca de la ciudad de Santander. Mientras estaba excavando en el suelo de la cueva, su hija de cinco años, que le había acompañado para observarle, gritó súbitamente: «¡Toros! ¡Toros!» El padre se acercó a mirar, y allí, en las paredes de la cueva, aparecían las pinturas de diversos animales que mostraban un vivo color y un detalle vigoroso.

Los antropólogos hallaron que era difícil aceptar que estas sofisticadas pinturas pudieran haber sido realizadas por el hombre primitivo. Sin embargo, algunos de los animales dibujados representaban tipos claramente extinguidos. El arqueólogo francés Henri-Édouard-Prosper Breuil halló manifestaciones de un arte similar en unas cuevas del sur de Francia. Por último, las diversas pruebas obligaron a los arqueólogos a aceptar los puntos de vista firmemente expresados por Breuil y a llegar a la conclusión de que los artistas habían vivido en la última parte del Paleolítico, es decir, aproximadamente en el año 10.000 a. de J.C.

Algo se conocía ya acerca del aspecto físico de estos hombres paleolíticos. En 1868, los trabajadores que estaban efectuando las obras de una explanación para el ferrocarril habían descubierto los esqueletos de cinco seres humanos en las llamadas cuevas de Cro-Magnon, al sudeste de Francia. Los esqueletos eran indudablemente de *Homo sapiens*, aunque algunos de ellos, y otros esqueletos similares que pronto se descubrieron en otros lugares, parecían tener una antigüedad de 35.000 a 40.000 años, según las pruebas geológicas de determinación cronológica. Estos ejemplares fueron denominados el «hombre de CroMagnon». De mayor talla que el promedio del hombre moderno, y dotado de una gran bóveda craneana, el hombre de Cro-Magnon es dibujado por los artistas como un individuo bien parecido y vigoroso, lo suficientemente moderno, en realidad su apariencia lo es, como para ser capaz de cruzarse con los seres humanos de hoy día.



[14]

La Humanidad, en esta época tan remota, no era una especie extendida por todo el planeta, tal como lo es en la actualidad. Con anterioridad al año 2.000, aproximadamente, a. de J.C., estaba confinada en la gran «isla mundo» de África, Asia y Europa. Fue solamente en un período posterior cuando las bandas de cazadores empezaron a emigrar, a través de los estrechos pasos que cruzaban el océano, a las Américas, Indonesia y Australia. Pero hasta el año 400 a. de J.C., e incluso más tarde, los navegantes polinesios no se atrevieron a cruzar las amplias extensiones del Pacifico, sin brújula y en embarcaciones que apenas eran algo más que simples canoas, para colonizar las islas de este océano. Finalmente, hasta bien entrado el siglo XX, el hombre no se asentó en la Antártida.
Pero si hemos de investigar la suerte del hombre prehistórico en el momento en que estaba confinado a una sola parte del área terrestre del planeta, tiene que existir alguna forma de datar los acontecimientos, al menos aproximadamente. Para ello, se han utilizado diversos métodos ingeniosos.
Por ejemplo, los arqueólogos se han servido de los anillos de los árboles, una técnica (la «dendrocronología») introducida en 1914 por el astrónomo americano Andrew Ellicott Douglass. Los anillos de los árboles están muy separados en los veranos húmedos, cuando se produce mucha madera nueva, y estrechamente espaciados en los veranos secos. Esta disposición, a través del paso de los siglos, se distingue perfectamente. La estructura anular de un trozo de madera que forma parte de un yacimiento primitivo puede coincidir con la imagen de un esquema cronológico conocido y, de este modo, obtenerse su edad.
Un sistema similar puede ser aplicado a las capas de sedimentos, o «varvas», abandonadas verano tras verano por los glaciares en fusión, en lugares como Escandinavia. Los veranos cálidos dejarán gruesas capas, los veranos fríos capas delgadas, y aquí también tenemos una medida diferenciadora. En Suecia, los acontecimientos pueden ser investigados por este procedimiento hasta hace dieciocho mil años.
Una técnica aún más notable es la que desarrolló, en 1946, el químico americano Willard Frank Libby. El trabajo de Libby tenía su origen en el descubrimiento hecho por el físico americano Serge Korff, en 1939, de que el bombardeo de la atmósfera por los rayos cósmicos produce neutrones. El nitrógeno reacciona con estos neutrones, dando lugar a carbono 14 radiactivo en nueve reacciones de cada 10 y produciendo hidrógeno 3 radiactivo en la restante reacción.
Como resultado de ello, la atmósfera contendría pequeñas trazas de carbono 14 (e incluso restos más pequeños de hidrógeno 3).
Libby dedujo que el carbono 14 radiactivo, creado en la atmósfera por los rayos cósmicos, penetraría en todos los tejidos vivos sirviendo de vía de entrada el anhídrido carbónico, absorbido en primer lugar por las plantas y transmitido luego a los animales. Durante toda su vida, la planta y el animal estarían recibiendo continuamente carbono radiactivo y mantendrían un nivel constante de él en sus tejidos. Pero, al morir el organismo, cesando

[14] Cráneos reconstruidos del (A) Zinjanthropus. (B) Pithecanthropus, (C) Neandertal y (D) Cro-Magnon.

con ello la adquisición de carbono, el carbono radiactivo en sus tejidos empezaría a disminuir por agotamiento radiactivo, en una proporción que viene determinada por sus cinco mil seiscientos años de vida media. Por tanto, un trozo de hueso conservado, o un resto de carbón vegetal de una antigua hoguera, o bien los residuos orgánicos de cualquier especie, podrían ser fechados midiendo la cantidad de carbono radiactivo perdido. El método ofrece una razonable precisión para objetos con una antigüedad de hasta 30.000 años, y este plazo abarca la historia arqueológica comprendida entre las civilizaciones antiguas y los comienzos del hombre de Cro-Magnon. Por el desarrollo de esta técnica de «arqueometría» Libby fue galardonado con el premio Nobel de Química en 1960.

El hombre de Cro-Magnon no fue el primer ser humano primitivo sacado a la luz por los arqueólogos. En 1857, en el valle de Neandertal de la región alemana del Rin, un labrador descubrió parte de un cráneo y algunos huesos largos que parecían humanos en esencia, aunque sólo imperfectamente humanos. El cráneo tenía una frente con una inclinación hacia atrás muy acusada y arcos superciliares muy pronunciados. Algunos arqueólogos sostuvieron que se trataba de los restos de un ser humano cuyos huesos habían sido deformados por la enfermedad, pero, a medida que pasaron los años, se hallaron otros esqueletos del mismo tipo, y se elaboró así una imagen detallada y consistente del hombre de Neandertal. Éste era un bípedo corto de talla, rechoncho y encorvado, con un promedio de estatura de metro y medio en el hombre, siendo el de la mujer algo menor. El cráneo era suficientemente voluminoso para albergar un cerebro de tamaño casi igual al del hombre moderno. Los artistas antropológicos dibujan a este ser con pecho abombado, velludo, frente pronunciada, barbilla hundida y expresión brutal, una imagen creada por el paleontólogo francés Marcellin Boule, quien fue el primero en describir un esqueleto casi completo de Neandertal, en 1911. Realmente, es probable que no tuviera un aspecto tan infrahumano como el que refleja esta imagen. El examen moderno del esqueleto descrito por Boule demuestra que había pertenecido a una criatura gravemente enferma de artritis. Un esqueleto normal proporcionaría una imagen muchísimo más humana. De hecho, el hombre de Neandertal, con un afeitado y un corte de pelo y vestido con un traje bien cortado, probablemente podría pasear por la Quinta Avenida de Nueva York sin llamar demasiado la atención.

Con posterioridad se hallaron restos del hombre de Neandertal no sólo en Europa, sino también en África del Norte, en Rusia y Siberia, en Palestina y en el Irak. Recientemente se han localizado cerca de 100 esqueletos diferentes en 40 lugares distintos y los hombres de esta clase existieron sin duda no hace más que 30.000 años. Y se descubrieron restos de esqueletos, en cierto modo parecidos a los del hombre de Neandertal, en lugares aún más remotos; éstos fueron el hombre de Rhodesia, descubierto en el norte de Rhodesia, en el África meridional, en 1921, y el hombre de Solo, hallado en las riberas del río Solo en Java, en 1931.

Se consideró que éstas eran especies separadas del género *Homo,* y así los tres tipos fueron denominados *Homo neanderthalensis, Horno rhodesiensis,* y *Horno solensis.* Pero algunos antropólogos y evolucionistas sostenían que los tres debían ser colocados en la misma especie de *Horno sapiens,* como «variedades» o «subespecies» del hombre. Existieron hombres que llamamos *sapiens* viviendo en la misma época que el hombre de Neandertal y se han hallado formas intermedias que sugieren que pudieron haberse cruzado entre sí. Si el hombre de Neandertal y sus parientes pueden ser clasificados como *sapiens*, en este caso nuestra especie tiene quizás una antigüedad de doscientos mil años. Otro supuesto pariente del hombre de Neandertal, «el hombre de Heidelberg» (del cual solamente se descubrió un hueso de mandíbula en 1907 y desde entonces ningún otro resto), es mucho más antiguo, y, si lo incluimos en nuestra especie, la historia del *Homo sapiens* debe remontarse aún mucho más atrás en el pasado. Realmente, en Swanscombe, Inglaterra, los arqueólogos han encontrado fragmentos de un cráneo que parecen ser definitivamente *sapiens* y pertenecer a una época considerablemente más antigua que el hombre de Neandertal. En

1966 se descubrió, cerca de Budapest, un resto de *Homo sapiens* con una antigüedad de unos 500.000 años.
El origen de las Esfecies de Darwin, por supuesto, desencadenó una frenética búsqueda de antepasados del hombre claramente subhumanos —lo que la Prensa popular dio en llamar el «eslabón perdido» entre el hombre y sus antepasados supuestamente simiescos. Esta búsqueda no podía resultar fácil. Los primates son inteligentes y pocos de ellos se dejan atrapar en situaciones que permitan la fosilización. Se ha estimado que la posibilidad de encontrar al azar un esqueleto de primate es de sólo una entre un cuatrillón.
En la década de 1880 a 1890, un paleontólogo holandés, Marie Eugene François Thomas Dubois, se empeñó en que los antepasados del hombre tenían que ser hallados en las Indias Orientales (la moderna Indonesia), donde todavía habitaban grandes simios (y también donde él podía trabajar cómodamente, ya que estas islas pertenecían entonces a Holanda). De forma bastante sorprendente, Dubois, trabajando en Java, la isla más populosa de Indonesia, ¡encontró en algún lugar una criatura intermedia entre el mono y el hombre! Después de tres años de búsqueda, halló la parte superior de un cráneo que tenía un tamaño superior al de un mono, aunque era más pequeño que uno de tipo humano. Al año siguiente, halló un fémur igualmente intermedio. Dubois denominó a su «hombre de Java» *Pithecanthropus erectus* («hombre mono erecto»). Medio siglo más tarde, en la década de 1930 a 1940, otro holandés, Gustav H. R. von Koenigswald, descubrió más huesos de *Pithecanthropus* y confeccionó una imagen clara de una criatura de pequeño cerebro, pecho muy abombado y con un remoto parecido al hombre de Neandertal.
Mientras tanto, otros trabajadores habían hallado, en una cueva cerca de Pekín, cráneos, mandíbulas y dientes de un hombre primitivo, llamado por tanto, «el hombre de Pekín». Una vez se hubo hecho este descubrimiento, se supo que dientes semejantes ya habían sido localizados anteriormente en una farmacia de Pekín en donde eran guardados con fines medicinales. El primer cráneo intacto fue localizado en diciembre de 1929, y entonces se consideró que era muy similar al «hombre de Java». Quizás existió hace medio millón de años, empleó el fuego y poseyó herramientas de hueso y de piedra. Con el tiempo, se acumularon los fragmentos de cuarenta y cinco individuos, aunque desaparecieron en 1941, durante un intento de evacuación de los restos ante el peligro del avance japonés.
El hombre de Pekín fue llamado *Sinanthropus pekinensis* («el hombre chino de Pekín»). Sin embargo, al efectuar diversos exámenes de esos, comparativamente, homínidos de cerebro reducido, parece improcedente clasificar a los hombres de Pekín y de Java en géneros distintos. El biólogo germanoamericano Ernst Walter Mayr consideró erróneo clasificarlos en un género diferente al del hombre moderno, de modo que hoy se considera a los hombres de Pekín y de Java con dos variedades del *Horno erectus.* No obstante, es improbable que la Humanidad tuviera su origen en Java, pese a la existencia allí de una variedad de criatura humanoide de pequeño cerebro. («Homínido» es el término que se aplica a todas las criaturas que se parecen más al hombre que al mono.) Durante algún tiempo se sospechó que el enorme continente de Asia primitivamente habitado por el «hombre de Pekín», era el lugar de origen del hombre, pero, a medida que avanzó el siglo XX, la atención se dirigió cada vez con mayor firmeza al continente africano, el cual, después de todo, es el continente más rico en vida primate en general, y en primates superiores en particular.
Los primeros hallazgos significativos en África fueron realizados por dos científicos ingleses, Raymond Dart y Robert Broom. Un día de primavera, en 1924, los obreros que efectuaban voladuras en una cantera de piedra caliza, cerca de Taungs, en Sudáfrica, sacaron a la luz un pequeño cráneo de apariencia casi humana. Lo enviaron a Dart, un anatomista que trabajaba en Johannesburgo. Inmediatamente, éste identificó el cráneo como perteneciente a un ser intermedio entre el hombre y el mono, y lo denominó *Australopithecus africanus* («mono del sur de África»). Cuando su artículo describiendo el hallazgo se publicó en Londres, los antropólogos creyeron que había sufrido un error y confundido a

un chimpancé con un hombre mono. Pero Broom, un entusiasta buscador de fósiles, que desde siempre había estado convencido de que el hombre tuvo su origen en África, corrió a Johannesburgo y proclamó que el *Australopithecus* era lo más parecido al eslabón perdido que hasta entonces se había descubierto.
Durante las décadas siguientes, Dart, Broom y diversos antropólogos intensificaron sus esfuerzos, consiguiendo hallar muchos más huesos y dientes del hombre mono sudafricano, así como también las mazas que utilizaban para cazar, los huesos de los animales muertos por él y las cuevas donde vivía. El *Australopithecus* era una especie de criatura dotada de un pequeño cerebro, con una cara puntiaguda, en muchos aspectos «menos humano que el hombre de Java. Pero, sin embargo, tenía cejas y dientes más humanos que el *Pithecanthropus.* Caminaba erecto, utilizaba herramientas, y probablemente poseía una forma primitiva de lenguaje. En resumen, era una variedad africana de homínido que había vivido, como mínimo, medio millón de años atrás y que era más primitivo que el *Homo erectus.*
No existían pruebas suficientes para deducir una prioridad entre el *Auslralopilhecus* de África y el *Pithecanthropus* de Asia o Indonesia, pero la balanza se inclinó definitivamente, hacia África como resultado del trabajo del súbdito inglés, nacido en Kenya, Louis S. B. Leakey y su esposa Mary. Con paciencia y tenacidad, los Leakey rastrearon áreas prometedoras de África Oriental en busca de primitivos restos de homínidos. El más prometedor fue Olduvai Gorge, en lo que hoy es Tanzania y, luego, el 17 de julio de 1959, Mary Leakey coronó más de un cuarto de siglo de esfuerzos al descubrir los huesos de un cráneo que, una vez juntadas las piezas, demostraron haber contenido el cerebro más pequeño de cualquier homínido descubierto hasta entonces. Sin embargo, otras características demostraban que este homínido estaba más próximo al hombre que al simio, ya que caminaba erecto y alrededor dé sus restos se encontraron pequeños utensilios fabricados con guijarros. Los Leakey denominaron a su hallazgo *Zinjanthropus* («hombre del este de África», utilizando la designación árabe para el África Oriental). El *Zinjanthropus* no parece estar en la línea directa de ascendencia del hombre moderno. Sin embargo, otros fósiles anteriores, cuya antigüedad se cifra en dos millones de años, pueden haber estado más capacitados. Éstos, a quienes se ha dado el nombre de *Homo habilis* (hombre diestro), eran criaturas con una talla, de 1,40 m, tenían ya manos de pulgares articulados y suficientemente diestras (de ahí el nombre) para darles una apariencia humana en ese aspecto.
Con anterioridad al *Homo habilis* encontramos fósiles demasiado primitivos para recibir la denominación de homínidos, y nos aproximamos cada vez más al antecesor común del hombre y de los demás antropoides. Es el *Ramapithecus*, del cual se localizó una mandíbula superior en la India septentrional a principios de la década de 1930; su descubridor fue G. Edward Lewis. Este maxilar superior era bastante más parecido al humano que el de cualquier otro primate viviente, con la excepción, claro está, del propio hombre; tendría quizá una antigüedad de tres millones de años. En 1962, Leakey descubrió una especie allegada que, tras el análisis con isótopos, resultó remontarse a catorce millones de años atrás.
En 1948, Leakey descubrió un fósil todavía más antiguo (quizá veinticinco millones de años), que denominó «Procónsul». (Este nombre, que significa «antes de cónsul», fue asignado en honor de un chimpancé del Zoo londinense, llamado así.) El «Procónsul» parece ser el antepasado común de la mayor parte de familias de los grandes monos, el gorila, el chimpancé y el orangután.
Anteriormente a éste, por tanto, debió existir un antepasado común del «Procónsul» y el *Ramapithecus* (y del primitivo simio que fue el antepasado del moderno simio más pequeño, el gibón). Este ser, el primero de todas las especies simiescas, quizá debió existir hace unos cuarenta millones de años.
Durante muchos años, los antropólogos estuvieron grandemente desorientados por culpa de un fósil que parecía ser una especie de eslabón perdido, aunque de un tipo curioso e increíble. En 1911, cerca de un lugar llamado Piltdown Common, en Sussex, Inglaterra, los obreros que construían una carretera hallaron un

cráneo antiguo, roto, en un lecho de arena. El cráneo atrajo la atención de un abogado llamado Charles Dawson, quien hizo que lo examinara un paleontólogo, Arthur Smith Woodward, en el Museo Británico. El cráneo tenía frente alta, aunque los arcos superciliares eran poco pronunciados; parecía más moderno que el hombre de Neandertal. Dawson y Woodward se dedicaron a investigar en el lecho de arena para tratar de encontrar otras partes del esqueleto. Un día, Dawson, en presencia de Woodward, halló una mandíbula, aproximadamente en el mismo lugar en que habían encontrado los fragmentos del cráneo. Tenía la misma tonalidad pardorrojiza de los otros fragmentos, y, por tanto, al parecer procedía de la misma cabeza, ¡Pero la mandíbula, contrariamente al desarrollado cráneo humano, parecía pertenecer a un simio! Asimismo resultaba extraño que los dientes de la mandíbula, aunque simiescos, aparecían desgastados, como lo están los dientes humanos a causa de la masticación.
Woodward decidió que este mitad-hombre, mitad-mono podía ser una criatura primitiva, con un cerebro bien desarrollado y, sin embargo, con una mandíbula retrógrada. Presentó el hallazgo al mundo como el «hombre de Piltdown» o *Eoanthropus dawsoni* («el nombre original de Dawson»).
El hombre de Piltdown se convirtió cada vez más en una anomalía, al apreciar los antropólogos que en todos los restos fósiles, inclusive la mandíbula, el desarrollo del maxilar guardaba concordancia con el desarrollo del cráneo.
Finalmente, a principios de la década de 1950, tres científicos británicos, Kenneth Oakley, W. E. Le Gros Clark y J. S. Weiner, decidieron investigar la posibilidad de un fraude.
En efecto, resultó un fraude. La mandíbula pertenecía a un mono moderno y había sido añadida.
Otra singular anécdota sobre las reliquias de primates tuvo un final más feliz. Allá por 1935, Von Koenigswald encontró un inmenso colmillo fosilizado, aunque de apariencia humana, puesto a la venta en una farmacia de Hong Kong. Según parecía, el farmacéutico chino lo tomaba por un «diente de dragón» con inapreciables propiedades medicinales. Von Koenigswald rebuscó en otras farmacias chinas y consiguió otros cuatro molares semejantes antes de que la Segunda Guerra Mundial pusiera fin temporalmente a sus actividades.
La naturaleza casi humana de aquellos dientes hizo pensar que en algún tiempo pretérito habían merodeado por la Tierra unos seres humanos gigantescos, tal vez con una talla de 2,70 m. Por aquellas fechas se tendió a aceptar esta posibilidad, quizá porque la Biblia dice (Génesis, 6:4): «Existían entonces los gigantes en la Tierra.» Sin embargo, entre 1956 y 1968 se encontraron cuatro maxilares en los cuales encajaban dichos dientes. Se conceptuó a este ser, el *Gigantopithecus*, como el mayor primate de todos los conocidos hasta entonces; pero evidentemente se trataba de un antropoide y no de un homínido, pese a la apariencia humana de su dentadura. Probablemente sería una criatura semejante al gorila, con 2,70 m de altura en posición vertical y 272 kg de peso. Quizá fuera coetáneo del *Homo erectus* y poseyera los mismos hábitos alimentarios (de ahí la similitud entre ambas dentaduras). Desde luego, su especie debe haberse extinguido hace un millón de años y, por tanto, no puede haber dado pie al mencionado versículo bíblico.
Es importante hacer constar que el resultado claro de la evolución humana ha sido la producción de una sola especie tal como existe hoy día. Es decir, aunque haya habido un número considerable de homínidos, sólo una especie ha sobrevivido. Todos los hombres del presente son *Homo sapiens*, cualesquiera sean sus diferentes apariencias, y la diferencia entre negros y blancos es aproximadamente la misma que, entre caballos de diferente pelaje.
Ahora bien, desde los albores de la civilización, el hombre ha manifestado recelo ante las diferencias raciales, y usualmente las restantes razas humanas le han hecho exteriorizar las emociones que despierta lo exótico, recorriendo toda la gama desde la curiosidad hasta el desprecio o el odio. Pero el racismo ha tenido raras veces repercusiones tan trágicas y persistentes como el conflicto moderno entre blancos y negros. (Se suele dar a los hombres blancos el calificativo de «caucásicos», término implantado, en 1775, por el antropólogo alemán Johann Friedrich

Blumenbach, quien tenía la errónea noción de que en el Cáucaso se hallaban los representantes más perfectos del grupo. Blumenbach clasificó también a los negros como «etiópicos» y a los asiáticos orientales como «mogólicos», denominaciones que se usan todavía ocasionalmente.) El conflicto entre blanco y negro, entre caucásico y etiópico por así decirlo, tuvo su peor fase en el siglo XV, cuando las expediciones portuguesas a lo largo de la costa occidental africana iniciaron un pingüe negocio con el transporte de negros para la esclavitud. Cuando prosperó este negocio y las naciones fundaron sus economías en el trabajo de los esclavos, se formularon racionalizaciones para justificar la esclavitud de los negros, invocando las Sagradas Escrituras, la moralidad social e incluso la ciencia.

Según la interpretación de la Biblia por los esclavistas —interpretación a la cual sigue dando crédito mucha gente hoy día— los negros eran descendientes de Cam, y, como consecuencia, formaban una tribu inferior marcada por la maldición de Noé: «...siervo de los siervos de sus hermanos será» (Génesis 9: 25). A decir verdad, se pronunció esa maldición contra el hijo de Cam, Canán, y sus descendientes los «cananitas», quienes fueron reducidos a la esclavitud por los israelitas cuando éstos conquistaron la tierra de Canán. Sin duda, las palabras en el Génesis 9: 25 representan un comentario «a posteriori» concebido por algún escritor hebreo de la Biblia para justificar la esclavitud de los cananitas. Sea como fuere, el punto crucial de la cuestión es que se hace referencia exclusivamente a los cananitas, y por cierto los cananitas eran hombres blancos.

Aquello fue una tergiversación interpretativa de la Biblia que aprovecharon los esclavistas con efectos contundentes en siglos pretéritos para abogar por la esclavitud del negro.

Los racistas «científicos» de tiempos más recientes pretendieron afirmarse sobre un terreno más trepidante todavía. Adujeron que el hombre negro era inferior al blanco porque, evidentemente, personificaba una fase más primitiva de la evolución. ¿Acaso su piel negra y su nariz aplastada, por ejemplo, no recordaban las del simio? Por desgracia, para su causa, ese curso de razonamiento conduce en dirección opuesta. El negro es el menos peludo de todos los grupos humanos. ¡A este respecto el negro se distancia más del mono que el hombre blanco! Téngase presente también que su pelo es lanudo y crespo, no largo y liso. Lo mismo podría decirse sobre los gruesos labios del negro; se asemejan a los del mono bastante menos que los labios usualmente delgados del hombre blanco.

La cuestión es ésta a fin de cuentas: cualquier tentativa para encasillar a los diversos grupos de *Homo sapiens* en el clasificador evolutivo es lo mismo que intentar hacer un trabajo delicado con toscas herramientas. La Humanidad consta de una sola especie y las variaciones habidas en su seno como respuesta a la selección natural son absolutamente triviales.

La piel oscura de quienes pueblan las regiones tropicales y subtropicales de la Tierra tiene innegable valor para evitar las quemaduras del sol. La piel clara de los europeos septentrionales es útil para absorber la mayor cantidad posible de radiación ultravioleta, considerando la luz solar relativamente débil de aquella zona, pues así los esteroles epidérmicos pueden producir suficiente vitamina D. Los ojos de estrecha abertura, comunes entre esquimales y mongoles, son muy valiosos para la supervivencia en países donde el reflejo de la nieve o de la arena del desierto es muy intenso. La nariz de puente alto y apretadas ventanillas nasales del europeo sirve para calentar el aire frío de los inviernos boreales, y así sucesivamente.

Como el *Horno sapiens* ha propendido siempre a hacer de nuestro planeta un mundo, en el pasado no han surgido diferencias básicas entre las constituciones de los grupos humanos, y todavía es menos probable que surjan en el futuro. El mestizaje está nivelando paulatinamente los rasgos hereditarios del hombre. El negro americano representa uno de los ejemplos más característicos. Pese a las barreras sociales contra los matrimonios mixtos, se calcula que las cuatro quintas partes aproximadamente de los negros estadounidenses tienen algún ascendiente blanco. Hacia fines del siglo XX, probablemente ya no habrá ningún negro de «pura raza» en los Estados Unidos.

No obstante, los antropólogos muestran sumo interés por la raza, pues este tema puede orientarles ante todo para estudiar las migraciones del hombre primitivo. No es nada fácil identificar específicamente cada raza. El color de la piel, por ejemplo, proporciona escasa orientación; el aborigen australiano y el negro africano tienen piel oscura, pero la relación entre ambos es tan estrecha como la que pudieran tener con los europeos. Tampoco es muy informativa la línea del cráneo —«dolicocéfalo» (alargado) frente a «braquicéfalos» (redondeado), términos implantados en 1840 por el anatomista sueco Anders Adolf Retzius— aún cuando se clasifique a los europeos en función de ella para formar subgrupos. La relación entre la longitud y anchura de la cabeza multiplicada por ciento («índice cefálico», o «índice craneal», si se emplean las medidas del cráneo) sirvió para dividir a los europeos en «nórdicos», «alpinos» y «mediterráneos». Sin embargo, las diferencias entre un grupo y otro son pequeñas, y las diferenciaciones dentro de cada grupo, considerables. Por añadidura, los factores ambientales tales como deficiencias vitamínicas, tipo de cuna donde duerme el lactante, etc., influyen sobre la forma del cráneo.

Pero los antropólogos han encontrado un excelente indicador de la raza en los grupos sanguíneos. El bioquímico William Clouser Boyd, de la Universidad de Boston, fue una eminencia en este terreno. Él puntualizó que el grupo sanguíneo es una herencia simple y comprobable, no la altera el medio ambiente, y se manifiesta claramente en las diferentes distribuciones entre los distintos grupos raciales.

Particularmente el indio americano constituye un buen ejemplo. Algunas tribus son casi por completo de sangre O; otras tienen O, pero con una considerable adición de A; prácticamente ningún indio tiene sangre B o AB, y si algún indio americano posee B o AB, es casi seguro que tienen algún ascendiente europeo. Asimismo, los aborígenes australianos tienen un elevado porcentaje de O y A con la inexistencia casi virtual de B. Pero se distinguen de los indios americanos por el elevado porcentaje de un grupo sanguíneo descubierto recientemente, el M, y el bajo porcentaje del grupo N, mientras que los indios americanos tienen abundante N y poco M.

En Europa y Asia, donde la población está más mezclada, las diferencias entre los pueblos son pequeñas, pero están bien definidas. Por ejemplo, en Londres el 70 % de la población tiene sangre O, el 25 % A y el 5% B. En la ciudad rusa de Jarkov, esa distribución es del 60, 25 y 15 %, respectivamente. Generalmente, el porcentaje de B aumenta cuanto más se avanza hacia la Europa Oriental, alcanzando el punto culminante del 40 % en Asia central. Ahora bien, los genes del tipo sanguíneo revelan las huellas no borradas totalmente todavía de migraciones pretéritas. La infiltración del gen B en Europa puede ser un leve indicio de la invasión de los hunos en el siglo XV y de los mongoles en el XIII. Otros estudios similares de la sangre en el Extremo Oriente parecen sugerir una infiltración relativamente reciente del gen A en Japón, desde el Sudoeste, y del gen B en Australia, desde el Norte.

Una repercusión particularmente interesante e insospechada de las primeras migraciones europeas se da en España. Este caso se descubrió en un estudio sobre la distribución de la sangre Rh. (Los grupos sanguíneos Rh se denominan así por la reacción de la sangre frente al antisuero preparado en combinación con los hematíes del mono Rhesus. Ahí hay por lo menos ocho alelomorfos del correspondiente gen; siete se llaman «Rh positivos», y el octavo, recesivo con respecto a todos los demás, se denomina «Rh negativo», porque surte efecto solamente cuando una persona ha recibido los alelomorfos de ambos padres.) En los Estados Unidos, el 85 % de la población es Rh positivo, y el 15 % Rh negativo. Esa misma proporción se mantiene en casi todos los pueblos europeos.

Pero, como nota curiosa, los vascos constituyen una excepción con un 60 % aproximado de Rh negativo y un 40 % de Rh positivo, y los vascos son también similares por su lengua, la cual no está relacionada lo más mínimo con ningún otro idioma conocido.

De ahí se puede inferir esta conclusión: los vascos son el remanente de algún pueblo Rh negativo que invadió Europa en tiempos prehistóricos. Se supone que alguna oleada ulterior de tribus invasoras Rh positivas les harían replegarse a su montañoso refugio en el rincón occidental del continente; es decir, hoy permanece allí el único grupo superviviente de los «primitivos europeos». Los pequeños residuos de genes Rh negativos en el resto de Europa y entre los descendientes americanos de colonizadores europeos pueden representar un legado de aquellos europeos primigenios.

Los pueblos asiáticos, los negros africanos, los indios americanos y los aborígenes australianos son casi totalmente Rh positivos.

El Futuro Del Hombre

Todo intento de profecía sobre el futuro de la raza humana es una proposición muy aventurada, y por ello creemos preferible dejársela a los místicos y los escritores de ciencia-ficción (aunque, por cierto, yo también escribo obras de ciencia-ficción entre otras cosas). Pero sí podemos afirmar una cosa con bastante seguridad. A menos que no sobrevenga una catástrofe mundial, tal como una guerra nuclear total, o un ataque masivo desde el espacio exterior o la pandemia de una enfermedad nueva y letal, la población humana crecerá rápidamente. Ahora es ya tres veces mayor que hace solamente siglo y medio. Según se ha calculado, el número de seres humanos que han vivido sobre la Tierra durante el período de los últimos 60.000 años se eleva a setenta y siete billones. Si ese cálculo es acertado, en estos momentos vive el 4 % de todos los seres humanos que han alentado sobre la corteza terrestre, y la población mundial sigue aumentando a un ritmo tremendo..., un ritmo más rápido que en ninguna época anterior.

Como no tenemos censos de las poblaciones antiguas, debemos calcularlos por aproximación, tomando como base todo cuanto conocemos sobre las condiciones de la vida humana. Los ecólogos opinan que el abastecimiento de alimentos «preagrícolas» —obtenidos mediante la caza, la pesca, la recolección de frutos silvestres y nueces, etc.—, no pudo haber procurado la manutención de una población mundial superior a los veinte millones, y con toda probabilidad, la población existente durante el Paleolítico fue solamente la tercera parte de esa cifra o la mitad a lo sumo. Esto significa que en el año 6.000 a. de J.C. habría entre seis y diez millones de personas, es decir, aproximadamente la población de una ciudad actual, como Tokio o Nueva York. (Cuando se descubrió América, los indios colectores de alimentos no sumarían más de 250.000 en lo que es hoy Estados Unidos, lo cual equivale a imaginar la población de Dayton [Ohio] extendida por todo el continente.) El primer gran salto de la población mundial llegó con la revolución neolítica y la agricultura. El biólogo británico Julian Sorrell Huxley (nieto de aquel Huxley que fuera el «bulldog de Darwin») calcula que la población inició entonces su crecimiento a un ritmo que la duplicaba cada mil setecientos años más o menos. Al comenzar la Edad de Bronce, la población sumaría un total aproximado de veinticinco millones; con el comienzo de la Edad de Hierro serían setenta millones, y al iniciarse la Era Cristiana, ciento cincuenta millones, cuya tercera parte poblaría el Imperio romano, otra tercera parte el Imperio chino y la última estaría diseminada en diversas regiones.

Allá por 1600, la población totalizaría, quizá, ciento cincuenta millones, una cifra considerablemente inferior a la población actual de China solamente.

Llegados a ese punto, concluyó el discreto ritmo de crecimiento y la población estalló. Exploradores del mundo entero, abrieron para la colonización europea unos 4.500.000 km: en nuevos continentes casi desiertos. La revolución industrial del siglo XVIII aceleró la producción de alimentos... y personas. Incluso los dos gigantes rezagados, China e India, participaron en esa explosión demográfica. Desde entonces, la duplicación de la población mundial no requirió un período de casi dos milenios, sino dos siglos. La población se elevó de quinientos millones en 1600 a novecientos millones en 1800. A partir de aquel salto, siguió creciendo a un ritmo más acelerado todavía.

En 1900, alcanzó ya los mil seiscientos millones. Durante los primeros setenta años del siglo XX ha escalado hasta los tres mil seiscientos millones, pese a dos demoledoras guerras mundiales. Corrientemente, la población mundial aumenta al ritmo de 220.000 personas por día o setenta millones cada año.

Esto es un incremento al ritmo del 2 % anual (algo muy considerable comparado con el aumento del 0,3 % anual en 1650). A esta marcha, la población terrestre se duplicará dentro de treinta y cinco años aproximadamente, y en ciertas regiones, tales como América Latina, esa duplicación tendrá lugar dentro de un período más breve. Hay buenas razones para temer que la población mundial rebase la cota de seis mil millones en el año 2000.

Por el momento, los analistas de la explosión demográfica propenden acentuadamente al criterio «maltusiano» que se hizo impopular desde su divulgación en 1798. Como ya he dicho anteriormente, Thomas Robert Malthus aseveró en su obra *An Essay on the Principle of Population*, que la población tiende siempre a crecer más aprisa que la producción de alimentos teniendo como inevitable desenlace las plagas de hambre y las guerras. A despecho de sus predicciones, la población mundial ha seguido creciendo sin sufrir percances graves durante el último siglo y medio. Pero debemos agradecer en gran medida el aplazamiento de lo catastrófico al hecho de que se ofrezcan todavía vastas áreas terrestres para la expansión y la producción de alimentos. Ahora empiezan a escasear las nuevas tierras laborables. Una gran mayoría de la población mundial está desnutrida, y la Humanidad debe esforzarse denodadamente por superar ese estado famélico crónico.

Desde luego, puede explotarse el mar de forma más racional y multiplicar su entrega de alimentos. El empleo de fertilizantes químicos debe implantarse todavía en inmensas zonas. La aplicación apropiada de pesticidas debe reducir la pérdida de alimentos producida por los insectos depredadores en áreas donde no se ha remediado aún tal pérdida. Se dispone también de medios para estimular directamente el desarrollo de las plantas. Hormonas vegetales, tales como la «gibelerina» (descubiertas por bioquímicos japoneses antes de la Segunda Guerra Mundial, sometidas a la atención de los occidentales en la década 1950-1960), podrían acelerar el crecimiento vegetal, mientras que pequeñas porciones de antibióticos, agregadas al pienso de los animales, acelerarían asimismo su crecimiento (tal vez suprimiendo la bacteria intestinal que les disputa el alimento cuando llega a los intestinos, y eliminando las infecciones benignas, pero debilitantes). No obstante, al haber tantas nuevas bocas para alimentar, multiplicándose con la rapidez antedicha, se requerirán gigantescos esfuerzos para mantener meramente la población mundial en el mediocre nivel presente, donde trescientos millones de niños menores de cinco años esparcidos por el mundo entero sufren una depauperación continua hasta el punto de contraer dolencias cerebrales permanentes.

Incluso un recurso tan común (y tan desdeñado hasta fechas muy recientes) como es el agua potable, está empezando a resentirse de la escasez general. Hoy día se consume agua potable en el mundo entero a razón de 7.000.000.000.000 de litros diarios, aunque el total del agua de lluvia —por el momento, principal fuente suministradora de agua potable— equivale a esa cantidad multiplicada por cincuenta, sólo una fracción de ella es fácilmente recuperable. Y en los Estados Unidos, donde se consume agua potable a razón de doce mil trescientos millones de litros diarios —una proporción per cápita mayor, por lo general, que en el resto del mundo— sólo se embalsa y emplea de una forma u otra el 10 % del total del agua de lluvia.

Así, resulta que la construcción de presas en los lagos y ríos del mundo es cada vez más intensa. (Las presas de Siria e Israel, en el Jordán, o de Arizona y California, en el río Colorado, sirven como ejemplo.) Se abren pozos cada vez más profundos, y en algunas regiones terrestres el nivel de las aguas subterráneas desciende peligrosamente. Se han efectuado diversas tentativas para conservar el agua potable, incluyendo el uso del alcohol cetílico para cubrir lagos y embalses en zonas de Australia, Israel y África Oriental. El alcohol cetílico se extiende como una película con un grosor igual al de una molécula, e impide la evaporación del agua

sin contaminarla. (Desde luego, la contaminación del agua mediante las aguas fecales y los desperdicios industriales ocasiona un perjuicio adicional a las menguantes reservas de agua potable.)
Al parecer, algún día se hará necesario obtener agua potable de los océanos, pues éstos ofrecen un abastecimiento ilimitado para un futuro previsible. Entre los métodos más prometedores de desalinización figuran la destilación y el congelamiento. Por añadidura, se están haciendo experimentos con membranas que seleccionarán las moléculas de agua para darles paso y rechazarán los diversos iones. Reviste tal importancia este problema que la Unión Soviética y los Estados Unidos están proyectando emprender la tarea conjuntamente, cuando resulta tan difícil concertar la cooperación entre esos dos países siempre dispuestos a competir entre sí.
Pero seamos optimistas mientras nos sea posible y no reconozcamos ninguna limitación del ingenio humano. Supongamos que mediante los milagros tecnológicos se decuplica la productividad de la Tierra; supongamos que extraemos los metales del océano, abrimos innumerables pozos petrolíferos en el Sáhara, encontramos minas carboníferas en la Antártida, domeñamos la energía de la luz solar y acrecentamos el poder de la fusión. ¿Qué ocurrirá entonces? Si la población humana sigue creciendo sin control al ritmo actual, toda nuestra Ciencia, todos nuestros inventos técnicos, serían equiparables al incesante laborar de Sísifo.
Si alguien no se sintiera muy dispuesto a aceptar esa apreciación pesimista, consideremos por un momento el poder de la progresión geométrica. Se ha calculado que la cantidad total de materia viva sobre la Tierra es igual hoy día a 2×10^{19} g. Pues bien, entonces la masa total humana representará aproximadamente 1/100.000 de la masa total de la vida.
Si la población terrestre continúa duplicando su número cada treinta y cinco años (como lo está haciendo ahora) cuando llegue el 2750 A.D., se habrá multiplicado por 100.000. Entonces tal vez resulte extremadamente difícil incrementar la masa de vida como un conjunto que la Tierra pueda soportar (aunque algunas especies puedan multiplicarse siempre a costa de otras). En tal caso, cuando llegue el 2750 A.D., la masa humana abarcará la vida entera y nosotros quedaremos reducidos al canibalismo, si es que hay supervivientes.
Aunque nos sea posible imaginar una producción artificial de alimentos pertenecientes al mundo inorgánico, mediante el cultivo de fermentos, el cultivo hidropónico (crecimiento de las plantas en soluciones químicas) y así sucesivamente, ningún progreso concebible podrá igualar el inexorable desarrollo numérico producido por la duplicación cada treinta y cinco años. A este tenor, en el 2600 A.D. ¡la población alcanzará los 630.000.000.000! Nuestro planeta sólo nos ofrecerá espacio para mantenemos derechos, pues se dispondrá únicamente de 3 cm: por persona en la superficie sólida, incluyendo Groenlandia y la Antártida. Es más, si la especie humana continúa multiplicándose al mismo ritmo, en el 3550 A.D, la masa total de tejido humano será igual a la masa de la Tierra.
Si hay quienes ven un escape en la emigración a otros planetas, tendrán materia suficiente para alimentar esos pensamientos con el siguiente hecho: suponiendo que hubieran 1.000.000.000.000 de planetas inhabitables en el Universo y se pudiera transportar gente a cualquiera de ellos cuando se estimara conveniente, teniendo presente el actual ritmo del crecimiento cuantitativo, cada uno de esos planetas quedaría abarrotado literalmente y sólo ofrecerían espacio para estar de pie allá por el 5000 A.D. ¡en el 7000 A.D., la masa humana sería igual a la masa de todo el Universo conocido!
Evidentemente, la raza humana no puede crecer durante mucho tiempo al ritmo actual, prescindiendo de cuanto se haga respecto al suministro de alimentos, agua, minerales y energía. Y conste que no digo «no querrá», «no se atreverá» o «no deberá»: digo lisa y llanamente «no puede».
A decir verdad, los meros números no serán lo que limiten nuestro crecimiento, si éste prosigue con el mismo ritmo. No será sólo que haya más hombres, mujeres y niños cada minuto, sino también que cada individuo utilizará (como promedio) más recursos no reintegrables de la Tierra, consumirá más energía, producirá más

desperdicios y contaminación cada minuto. Mientras la población continúe duplicándose cada treinta y cinco años como hasta ahora, la utilización de energía se acrecentará en tal medida que al cabo de treinta y cinco años no se duplicará ¡se septuplicará! El ciego afán por desperdiciar y envenenar más y más aprisa cada año nos conduce hacia la destrucción con mayor celeridad incluso que la mera multiplicación. Por ejemplo, los humos producidos por la combustión de carbón y petróleo salen libremente al aire en el hogar y la fábrica, tal como los desperdicios químicos gaseosos de las plantas industriales. Los automóviles por centenares de millones expulsan el humo de la gasolina y los productos resultantes de su desintegración y oxidación, por no mencionar el monóxido de carbono o los compuestos de plomo. Los óxidos de sulfuro de nitrógeno (formados bien directamente o por oxidación ulterior bajo la luz ultravioleta del sol) pueden, juntamente con otras sustancias, corroer los metales, desgastar el material de construcción, agrietar el caucho, perjudicar las cosechas, causar y agravar enfermedades respiratorias e incluso figurar entre las causas del cáncer pulmonar.
Cuando las condiciones atmosféricas son tales que el aire sobre una ciudad permanece estático durante cierto tiempo, las materias contaminadoras se aglomeran, ensucian el aire, favorecen la formación de una bruma humosa *(smog)* sobre la cual se hizo publicidad por vez primera en Los Ángeles, aunque ya existía desde mucho tiempo atrás en numerosas ciudades y hoy día existe en muchas más. Mirándolo desde su aspecto más nocivo, puede arrebatar millares de vidas entre aquellas personas cuya edad o enfermedad les impide tolerar esa tensión adicional en sus pulmones. Han tenido lugar desastres semejantes en Donora (Pennsylvania), en 1948, y en Londres, en 1952.
Los desperdicios químicos contaminan el agua potable de la Tierra, y algunas veces ocasionan la noticia dramática. Así, por ejemplo, en 1970 se comprobó que los compuestos de mercurio vertidos con absoluta inconsciencia en las aguas mundiales se habían abierto camino hasta los organismos marinos, a veces en cantidades peligrosas.
A este paso, el océano dejará de ser para nosotros una fuente alimentaria ubérrima, pues habremos hecho ya un buen trabajo preliminar para envenenarlo por completo.
El uso desmedido de pesticidas persistentes ocasiona primero su incorporación a las plantas y luego a los animales. Debido a este envenenamiento progresivo, los pájaros encuentran cada vez más dificultades para formar normalmente las cáscaras de sus huevos; tanto es así que nuestro ataque contra los insectos amenaza con la extinción al halcón peregrino.
Prácticamente, cada uno de los llamados avances tecnológicos —concebidos apresurada e irreflexivamente para superar a los competidores y multiplicar los beneficios— suele crear dificultades. Los detergentes sintéticos vienen sustituyendo a los jabones desde la Segunda Guerra Mundial. Entre los ingredientes importantes de esos detergentes hay varios fosfatos que disueltos en el agua facilitan y aceleran prodigiosamente el crecimiento de microorganismos, los cuales consumen el oxígeno del agua causando así la muerte de otros organismos acuáticos. Esos cambios deletéreos del hábitat acuátil («eutroficación») están produciendo el rápido envejecimiento, por ejemplo, de los Grandes Lagos —sobre todo, el poco profundo lago Erie— y abreviando su vida natural en millones de años. Así, el lago Erie será algún día la ciénaga Erie, mientras que el pantano de Everglades se desecará totalmente.
Las especies vivientes son interdependientes a ultranza. Hay casos evidentes como la conexión entre plantas y abejas, donde las abejas polinizan las plantas y éstas alimentan a las abejas, y millones de otros casos menos evidentes. Cada vez que la vida facilita o dificulta las cosas a una especie determinada, docenas de otras especies sufren las repercusiones... Algunas veces de forma difícilmente previsible. El estudio de esas interconexiones vitales, la ecología, no ha despertado hasta ahora el interés general, pues en muchos casos la Humanidad, en su afán por obtener ganancias a corto plazo, ha alterado la estructura ecológica hasta el punto de crear graves dificultades a largo plazo. Es preciso aprender a explorar el terreno concienzudamente antes de saltar.

Incluso se hace necesario reflexionar con cordura sobre un asunto tan exótico aparentemente como es la cohetería. Un solo cohete de gran tamaño puede inyectar gases residuales por centenares de toneladas en la atmósfera más allá de los 155 km. Esas cantidades pueden alterar apreciablemente las propiedades de la tenue atmósfera superior y desencadenar cambios climáticos imprevisibles. Hacia 1971 se propuso emplear gigantescos aviones comerciales supersónicos (SST) cuyas trayectorias atravesarían la estratosfera para permitirles viajar a velocidades superiores a la del sonido. Quienes se oponen a su utilización no sólo citan el factor «ruido» debido a las explosiones sónicas, sino también la posibilidad de una contaminación que podría perturbar el clima.
Otro elemento que da aún peor cariz al desarrollo cuantitativo, es la distribución desigual del género humano en la superficie terrestre. Por todas partes se tiende al apiñamiento dentro de las áreas urbanas. En los Estados Unidos, donde la población crece sin cesar, los Estados agrícolas no sólo participan en la explosión, sino que también están perdiendo pobladores. Se calcula que la población urbana del globo terráqueo se duplica no cada treinta y cinco años, sino cada once años. En el 2005 A.D., cuando la población total del globo terráqueo se haya duplicado, la población metropolitana habrá aumentado, a este ritmo, más de nueve veces.
Eso es inquietante. Hoy estamos presenciando ya una dislocación de las estructuras sociales, una dislocación que se acentúa en aquellas naciones progresivas donde la urbanización es más aparente. Dentro de esos países hay una concentración exorbitante en las ciudades, destacando especialmente sus distritos más populosos. Es indudable que cuando el hacinamiento de los seres vivientes rebasa ciertos límites, se manifiestan muchas formas de comportamiento patológico. Así se ha verificado mediante los experimentos de laboratorio con ratas: la Prensa y nuestra propia experiencia nos convencen de que ello es también aplicable a los seres humanos.
Así pues, parece evidente que *si las actuales tendencias prosiguen sin variación su camino,* las estructuras sociales y tecnológicas del mundo se vendrán abajo dentro del próximo medio siglo con derivaciones incalculables. La Humanidad, en su desenfrenado enloquecimiento, puede recurrir al cataclismo postrero, la guerra termonuclear.
Pero. *¿proseguirán* las actuales tendencias?
Indudablemente su cambio requerirá un gran esfuerzo general, lo cual significa que también será preciso cambiar unas creencias veneradas desde lejanas fechas. Durante casi toda la historia del hombre, éste ha vivido en un mundo donde la vida era breve y muchos niños morían en plena lactancia todavía. Para que no se extinguiera la población tribal, cada mujer debía engendrar tantos hijos como pudiera. Por esa razón se deificaba la maternidad y se estigmatizaba toda propensión tendente a reducir el índice de natalidad. Se restringía la posición social de las mujeres reduciéndolas a máquinas procreadoras y de crianza. Se supervisaba estrictamente la vida sexual aprobándose tan sólo aquellas acciones que culminasen con la concepción; todo lo demás se conceptuaba como perversión pecaminosa.
Pero ahora vivimos en un mundo superpoblado. Si hemos de evitar la catástrofe, será preciso considerar la maternidad como un privilegio muy especial otorgado con restricción. Deben evolucionar nuestras opiniones sobre el sexo y su asociación al alumbramiento.
Por otra parte, los problemas del mundo —los problemas verdaderamente serios— tienen carácter global. Los peligros inherentes a la superpoblación, la supercontaminación, la desaparición de recursos, el riesgo de guerra nuclear, afectan a cada nación y no podrán haber soluciones auténticas mientras no cooperen todos los países. Esto significa que una nación no puede seguir marchando sola por su propio camino desentendiéndose de las demás; las naciones no pueden continuar actuando con arreglo a la suposición de que hay una cosa llamada «seguridad nacional», según la cual algo bueno les sucederá a ellas si les sucede algo malo a las demás. En suma, se requiere urgentemente un gobierno mundial.

La Humanidad se orienta hacia ese fin (muy a pesar suyo en muchos casos), pero la cuestión es saber si el movimiento se consumará con la suficiente rapidez.
Nada más lejos de mi intención que dar una impresión de desesperanza, como si el género humano se hubiese metido en un callejón sin salida del cual ya no hubiera escape.
Una posible fuente de optimismo es la inminente revolución en materia de comunicaciones. Tal vez los satélites de comunicaciones, con su continua multiplicación, posibiliten, en un próximo futuro, la correspondencia entre cada persona y todas las demás. Entonces los países subdesarrollados se ahorrarán la necesidad de instalar una red antigua de comunicaciones con las consiguientes inversiones de capital, y se incorporarán directamente a un mundo de donde cada ser humano tenga su propia estación de televisión, por así decirlo, para recibir y emitir mensajes.
Así, el mundo se empequeñecerá considerablemente hasta parecer, por su estructura social, una especie de pueblo donde todos se conozcan. (Por cierto, que se ha empleado la expresión «pueblo global» para describir la nueva situación.) La pedagogía podrá llegar hasta los últimos rincones de ese pueblo global gracias a la ubicuidad de la Televisión. La nueva generación de cada país subdesarrollado crecerá aprendiendo los métodos modernos del agro, el uso apropiado de los fertilizantes y pesticidas y las técnicas para controlar la natalidad.
Tal vez se perfile incluso, por primera vez en la historia terrestre, una tendencia hacia la descentralización. Mediante la omnipresente televisión todos los lugares del mundo se beneficiarán por igual de las conferencias comerciales, las bibliotecas y los programas culturales, y como resultado no será tan necesario aglomerarlo todo para formar una masa inmensa y decadente.
¿Quién sabe, pues? La catástrofe parece haber cobrado ventaja, pero quizá no haya concluido todavía la carrera hacia la salvación.
Suponiendo que se gana esa carrera hacia la salvación, que los niveles de la población se estabilicen y dé comienzo un lento decrecimiento humano, que se instituya un gobierno Mundial efectivo y sensato, que tolere la diversidad local, pero no el crimen local, que se atienda a la estructura ecológica y se preserve sistemáticamente la Tierra... ¿cuál será entonces nuestro rumbo?
Por lo pronto, el hombre continuará extendiendo su radio de acción. Habiendo comenzado como un homínido primitivo en el África Oriental —inicialmente su difusión y sus éxitos serían tal vez similares a los del gorila, actual—, se extendió con parsimonia hasta que, hace quince mil años, colonizó toda la «isla mundial» (Asia, África y Europa). Luego dio el salto a las Américas, Australia y, por último, las islas del Pacífico. Llegado el siglo XX, la población siguió siendo escasa en áreas particularmente ingratas —tales como el Sáhara, el desierto arábigo y Groenlandia—, pero ninguna zona de tamaño medio estuvo deshabitada salvo la Antártida. (Hoy día, las estaciones científicas por lo menos se han instalado permanentemente en el más inhabitable de los continentes.) ¿Qué hacer a continuación?
Una respuesta posible es el mar. Fue precisamente en el mar donde se originó la vida, donde mejor florece todavía en términos puramente cuantitativos. Cada especie de animal terrestre, exceptuando los insectos, ha intentado experimentalmente el retorno al mar, atraída por sus reservas alimentarias relativamente inagotables y por la relativa uniformidad del medio. Entre los mamíferos, el ejemplo de la nutria, la foca o la ballena denotan unas fases progresivas de readaptación al medio acuático.
¿Podría retornar el hombre al mar, no mediante un cambio evolutivo de su cuerpo, lo cual requeriría una transformación demasiado lenta, sino con la ayuda rápida y eficaz del progreso tecnológico? Encerrado entre las paredes metálicas de submarinos y batiscafos, ha descendido ya hasta las mayores profundidades oceánicas.
Para la sumersión a cuerpo descubierto se requiere mucho menos. En 1943, el oceanógrafo francés Jacques-Ives Cousteau inventó el pulmón acuático. Este artefacto aporta oxígeno a los pulmones humanos desde un cilindro de aire comprimido, que el usuario lleva cargado a la espalda para practicar el moderno deporte del

buceo «scuba» («scuba» es un monograma imperfecto de «self-contained underwater-breathing apparatus» es decir, aparato autónomo para la respiración submarina). Esto posibilita la permanencia del hombre bajo el agua durante largos períodos y, completamente desnudo, por así decirlo, sin necesidad de encajonarse en naves submarinas ni cubrirse siquiera con ropas. Cousteau promocionó asimismo la construcción de viviendas submarinas, donde el hombre pudiera permanecer sumergido durante períodos más largos todavía. Por ejemplo, en 1964, dos individuos vivieron durante dos días en una tienda provista con aire a 130 m bajo el nivel del mar. (Uno fue John Lindbergh, hijo del aviador.) El hombre ha vivido ya varias semanas bajo el agua a menores profundidades.

Aún reviste más espectacularidad el acontecimiento ocurrido a principios de 1961. Por aquellas fechas, el biólogo Johannes A. Kylstra, de la Universidad de Leyden, empezó a hacer experimentos con el «agua respirable» empleando mamíferos. Al fin y al cabo, el pulmón y las branquias funcionan de la misma forma, si bien las branquias se han adaptado para trabajar en niveles inferiores de oxigenación. Kylstra elaboró una solución acuosa suficientemente parecida a la sangre del mamífero para evitar lesiones del tejido pulmonar, y luego la oxigenó a fondo. Comprobó que tanto los ratones como los perros podían respirar ese líquido durante períodos prolongados sin sufrir aparentemente daño alguno.

Los hámsters se mantienen vivos bajo el agua corriente si se les envuelve con una fina hoja de silicona, que deja pasar el oxígeno del agua hasta el hámster y el anhídrido carbónico del hámster hasta el agua. Esa membrana es virtualmente una branquia artificial. Con tales avances y otros ya en proyecto, el hombre puede mirar hacia un futuro prometedor. ¿Le será posible entonces permanecer bajo el agua durante períodos indefinidos y convertir toda la superficie del planeta —tierra y mar— en morada suya?

Y ¿qué decir del espacio exterior? ¿Necesita mantenerse el hombre sobre su planeta natal o puede aventurarse en otros mundos?

Apenas puesto en órbita el primer satélite el año 1957, se pensó, como es natural, que el sueño de los viajes espaciales, realizado solamente hasta entonces en las novelas de ciencia-ficción, podría llegar a ser una realidad, y, efectivamente, se dejaron transcurrir tan sólo tres años y medio tras el lanzamiento del *Sputnik I*, para dar el primer paso.

El 12 de abril de 1961, el cosmonauta soviético Yuri Alexeievich Gagarin fue situado en órbita y regresó de su aventura sano y salvo. Tres meses después, el 6 de agosto, otro cosmonauta soviético, Guermán Stepánovich Títov, trazó 17 órbitas antes de volver a la Tierra, pasando 24 horas en vuelo libre. El 20 de febrero de 1962, los Estados Unidos colocaron su primer hombre en órbita: el astronauta John Herschel Glenn circunvoló tres veces la Tierra.

También hubo una mujer —la cosmonauta soviética Valentina V. Tereshkova—, que fue lanzada el 16 de junio de 1963. Permaneció en vuelo libre durante 71 horas describiendo un total de 17 órbitas.

Otros cohetes han partido de la Tierra transportando dos y tres hombres juntos. El primer lanzamiento de ese tipo se hizo con los cosmonautas soviéticos Vladimir M. Komarov, Konstantin P. Feokstistov y Boris G. Yegorov el 12 de octubre de 1964. Los americanos lanzaron a Virgil I. Grissom y John W. Young, en el primer cohete «multitripulado» estadounidense, el 23 de marzo de 1965.

El hombre que abandonó su astronave y salió al espacio fue el cosmonauta soviético Alexei A. Leonov, quien realizó la hazaña el 18 de marzo de 1965. El astronauta americano Edward H. White emuló ese «paseo espacial» el 3 de junio de 1965.

Aunque casi todas las «primicias» espaciales en 1965 corrieron a cargo de los soviéticos, desde aquella fecha los americanos tomaron la delantera. Vehículos tripulados maniobraron en el espacio, dándose cita allí, acoplando sus cápsulas, distanciándose cada vez más.

Pese a todo, el programa espacial no siguió adelante sin los inevitables holocaustos. En enero de 1967, tres astronautas

americanos —Grissom, White y Roger Chaffee— murieron en tierra, víctimas de un incendio que estalló en su cápsula espacial durante una prueba rutinaria. Más tarde, el 23 de abril de 1967, Komarov murió al fallar su paracaídas durante el retorno. Fue el primer muerto en el curso de un vuelo espacial.
Aquellas tragedias retrasaron los planes americanos para alcanzar la Luna mediante naves con tres tripulantes (programa «Apolo»); se prefirió diseñar nuevamente las cápsulas espaciales para darles mayor seguridad, pero no se renunció a esos planes. El 11 de octubre de 1968 se lanzó el primer vehículo Apolo tripulado, *Apolo VII;* una tripulación de tres hombres bajo el mando de Walter M. Schirra. El *Apolo VIII,* lanzado el 21 de diciembre de 1968 al mando de Frank Borman, se aproximó a la Luna y la circunvoló a corta distancia. El *Apolo* X (18 de mayo de 1969) se aproximó también a la Luna, destacó el módulo lunar hasta unos 15 km de la superficie lunar.
Por último, el 16 de julio de 1969, se lanzó el *Apolo XI* al mando de Neil A. Armstrong. El 20 de julio, Armstrong fue el primer ser humano que pisó el suelo de otro mundo.
Desde entonces se lanzaron varios vehículos Apolo. Tres de ellos, los *Apolo XII, XIII* y *XIV* cumplieron sus misiones con extraordinario éxito. El *Apolo XIII* tuvo averías en el espacio y tuvo que regresar sin llevar a cabo el alunizaje, pero *regresó* incolumne, sin pérdida de vidas.
El programa espacial soviético no ha incluido todavía los vuelos de astronaves tripuladas a la Luna. No obstante, el 12 de septiembre de 1970, se proyectó una nave no tripulada hacia la Luna. El artefacto alunizó suavemente, recogió muestras del terreno, rocas, y las trajo a la Tierra sin dificultad. Más tarde, un vehículo automático soviético alunizó y evolucionó durante varios meses por la superficie lunar mediante control remoto, enviando datos sin cesar.
¿Qué hay acerca del futuro? El programa espacial ha sido muy costoso y ha tropezado con la resistencia creciente de ciertos científicos que lo juzgan demasiado tendente a las relaciones públicas y poco científico, o de quienes estiman que eclipsa otros programas cuya importancia científica es mucho mayor. Se ha encontrado también con la oposición creciente del gran público, que lo considera demasiado caro, sobre todo si se tienen en cuenta los acucientes problemas sociológicos de la Tierra.
No obstante, el programa espacial proseguirá probablemente su marcha, aunque a paso más lento; y si la Humanidad ideara algún procedimiento para gastar menos energías y recursos en la locura suicida de una guerra, sería muy probable que el programa incluso se acelerase. Se han forjado ya planes para establecer estaciones espaciales (grandes vehículos trazando órbitas más o menos duraderas alrededor de la Tierra y con suficiente capacidad para alojar un número crecido de hombres y mujeres durante extensos períodos) que permitan hacer observaciones y experimentos cuyos resultados serán presuntamente muy valiosos. Se diseñarán también astronaves menores para los viajes de enlace.
Se espera que las futuras visitas al satélite culminen con el establecimiento de colonias más o menos permanentes, y asimismo es de esperar que éstas puedan explotar los recursos lunares y prescindan del auxilio cotidiano desde la Tierra.
Ahora bien, ¿será posible ir más allá de la Luna? Teóricamente no hay impedimentos, pero los vuelos al siguiente mundo cuyo suelo se pueda pisar. Marte (Venus, aunque más cercano, tiene temperaturas excesivas para una astronave tripulada), no requerirán días como en el caso de la Luna, sino meses. Y para pasar esos meses, el hombre necesitará llevar consigo un medio ambiente donde pueda vivir.
El hombre ha adquirido ya alguna experiencia en ese terreno al descender a las profundidades oceánicas con submarinos y recipientes herméticos, como el batiscafo. A semejanza de esos viajes, se internará en el espacio con una gran burbuja de aire encerrada dentro de una resistente envoltura metálica, llevará consigo alimentos, agua y otros elementos necesarios para el viaje. Pero la salida al espacio se complicará enormemente con el problema de la irresistible gravedad. En la nave espacial se dedicará una gran proporción del peso y del volumen a la

maquinaria y el combustible; por consiguiente, la «carga útil» de tripulación y provisiones será al principio mínima.
Las vituallas deberán ser sumamente compactas: allí no habrá lugar para ningún alimento indigesto. El alimento artificial condensado podría estar compuesto por los siguientes elementos: lactosa, aceite vegetal digerible, mezclas apropiadas de aminoácidos, vitaminas, minerales con algo de condimento, y todo ello embalado en una caja minúscula de hidratos de carbono comestible. Una caja semejante, que contuviera 180 g de alimentos sólidos, bastaría para una comida. Tres cajas proporcionarían 3.000 calorías. A esto se debería agregar un gramo de agua por caloría (entre 2,5 y 3 litros diarios por persona); una parte podría mezclarse con el alimento para hacerlo más apetecible, lo cual requeriría una caja de mayor tamaño. Por añadidura, la nave debería transportar oxígeno respirable en la proporción de un litro (1.150 g) en forma líquida, por día y persona.
Así pues, las provisiones diarias para cada persona serían: 540 g de alimento seco, 2.700 g de agua y 1.150 g de oxígeno: Total: 4.390 g. Imaginemos ahora un viaje a la Luna, que requiriera una semana de ida, otra de vuelta y dos días para explorar la superficie lunar. Cada tripulante necesitará llevar 68 kg de alimentos, agua y oxígeno.
Con los niveles actuales de la tecnología, eso será factible probablemente.
Para una expedición de ida y vuelta a Marte, las necesidades serían infinitamente mayores. Un viaje semejante duraría dos años y medio, incluyendo una estancia de espera en Marte hasta que las posiciones orbitales planetarias llegasen a la fase favorable para emprender el regreso. Partiendo de esa base, el viaje requeriría unas cinco toneladas de alimentos, agua y oxígeno por tripulante. El transporte de semejante carga en una nave espacial es impracticable en las actuales condiciones tecnológicas.
La única solución razonable para tan largo viaje es prestar autonomía a la nave espacial, tal como la Tierra —ella misma una «nave» masiva surcando los espacios— es autónoma. Será preciso regenerar hasta el infinito, mediante reiterativos sistemas cíclicos, los alimentos, el agua y el aire que se lleven al partir.
Ya se ha elaborado en teoría esos «sistemas cerrados». La regeneración de los desperdicios tienen un sabor desagradable, pero éste es, al fin y al cabo, el proceso que mantiene la vida sobre la Tierra. Los filtros químicos a bordo de la nave podrían almacenar el anhídrido carbónico y el vapor de agua exhalado por los tripulantes; mediante la destilación y otros procesos se podría recuperar la urea, la sal y el agua de la orina y los excrementos; mediante la luz ultravioleta se esterilizarían los residuos fecales secos que, junto con el anhídrido carbónico y el agua, servirían para alimentar a las algas cultivadas en tanques. Mediante la fotosíntesis... estas algas convertirían el anhídrido carbónico y los compuestos nitrogenados de las heces en alimento orgánico —más oxígeno— para la tripulación. Lo único que se requeriría del exterior sería energía para los diversos procesos, incluida la fotosíntesis; pero el propio Sol la facilitaría.
Se ha calculado que una cantidad comparativamente insignificante —113 kg de algas por individuo— abastecería de alimentos y oxígeno a la tripulación durante un período indefinido. Añadiendo a eso el equipo necesario para tales manipulaciones, se tendría un peso total de provisiones por tripulante de 159 kg quizá, pero desde luego no más de 453 kg. Asimismo, se han hecho experimentos con sistemas donde se emplean bacterias consumidoras de hidrógeno. Éstas no requieren luz, simplemente hidrógeno, obtenible mediante la electrólisis del agua. Según los informes presentados, esos sistemas son mucho más eficaces que los organismos sintetizadores.
Aparte de los problemas planteados por el abastecimiento, existen también los de la prolongada ingravidez. Diversos individuos han vivido varias semanas de continua ingravidez sin sufrir daños permanentes, pero las perturbaciones menores han sido lo bastante numerosas para convertir la ingravidez prolongada en un factor inquietante. Por fortuna, existen medios de contrarrestar sus efectos. Por ejemplo, una lenta rotación de la nave espacial

produce cierta sensación de peso en virtud de la fuerza centrífuga que actúa ahí como fuerza gravitatoria.
Más serios y menos evitables son los riesgos de la gran aceleración y la súbita deceleración que los viajeros espaciales deberán soportar sin remedio en el despegue y aterrizaje de los cohetes.
Se denomina 1 *g* a la fuerza normal de gravedad en la superficie terrestre. La ingravidez es 0 *g*. Una aceleración (o deceleración) que duplique el peso del cuerpo será 2 *g*; si lo triplica, 3 *g*, y así sucesivamente.
La posición del cuerpo durante la aceleración es esencial. Si uno sufre esa aceleración con la cabeza hacia delante (o la deceleración con los pies hacia delante), la sangre escapará de su cabeza. Esto acarreará la pérdida de conocimiento si la aceleración es suficientemente elevada (digamos, 6 *g* durante cinco segundos). Por otra parte, si se sufre la aceleración con los pies hacia delante (llamada «aceleración negativa» en contraposición a la «positiva» con la cabeza hacia delante) la sangre acude de golpe a la cabeza. Esto es más peligroso, porque la exagerada presión puede romper vasos sanguíneos en los ojos o el cerebro. Los investigadores de la aceleración lo denominan *redout*. Una aceleración de 2 ½ *g*, durante 10 segundos, basta para lesionar varios vasos.
Así pues, la posición más conveniente para resistir tales efectos es la «transversal»: así se aplica la aceleración en ángulo recto al eje longitudinal del cuerpo. Varios individuos han resistido aceleraciones transversales de 10 g durante dos minutos en una cámara centrífuga sin perder el conocimiento.
En los períodos, más breves, la tolerancia será mucho mayor. El coronel John Paul Stapp y otros voluntarios mostraron una asombrosa resistencia al soportar elevadas deceleraciones *g* en la pista de pruebas de la base aérea de Holloman, en Nuevo México. En su famosa carrera del 10-12-1954, Stapp soportó una deceleración de 25 *g* durante un segundo aproximadamente. Su deslizador, lanzado a 372 km por hora, se detuvo bruscamente al cabo de 1,4 segundos. Según se calculó, eso era lo mismo que lanzarse con un automóvil contra una pared ¡a 190 km por hora! Desde luego, Stapp marchó bien sujeto con correas y tirantes al deslizador para reducir en lo posible las probabilidades de lesiones. Sólo sufrió algunas contusiones y un doloroso trauma en la cara que le amorató los dos ojos.
Al despegar, el astronauta puede absorber (durante un breve lapso) hasta 6,5 *g*, y en el retorno, 11 *g* como máximo.
Artificios tales como divanes amoldables al cuerpo o correajes y quizás, incluso, inmersión en una cápsula llena de agua o indumentaria espacial, proporcionan suficiente margen de seguridad contra las poderosas fuerzas *g*.
Se han emprendido estudios y experimentos similares sobre los riesgos de la radiación, el tedio producido por un prolongado aislamiento, la extraña experiencia de encontrarse en un espacio insonoro donde nunca anochece y otras condiciones atemorizantes que han de soportar los aviadores espaciales. A pesar de todo, quienes se preparan para la primera expedición humana lejos del planeta natal no parecen arredrarse ante los obstáculos.

XVI. LA MENTE

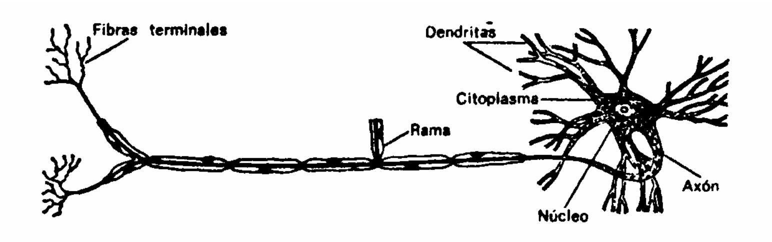
El Sistema Nervioso

Hablando en términos físicos, el ser humano es un ente que, a diferencia de otros organismos, realmente llama poco la atención. No puede competir en fuerza con la mayor parte de los otros animales de su tamaño, camina torpemente cuando se le compara, digamos, con el gato; no puede correr como el perro y el gamo; por lo que respecta a su visión, oído y sentido del olfato, es inferior a un cierto número de otros animales. Su esqueleto está mal adaptado a su postura erecta: el ser humano es probablemente el único animal que sufre lumbago a causa de su postura y actividades normales. Cuando pensamos en la perfección evolutiva de otros organismos —la maravillosa capacidad del pez para nadar o del ave para volar, la enorme fecundidad y adaptabilidad de los insectos, la perfecta simplicidad y eficacia del virus—, el hombre parece, por supuesto, una criatura desgarbada y

pobremente constituida. Como organismo, apenas puede competir con las criaturas que ocupan cualquier nicho ecológico específico en la Tierra. No obstante, ha conseguido dominar este planeta gracias únicamente a una especialización bastante importante: su cerebro.

Una célula es sensible a un cambio en su medio ambiente («estímulo») y reacciona de forma apropiada («reapuesta»). Así, un protozoo nadará hacia una gota de una solución de azúcar depositada en el agua a su alrededor, o se alejará de una gota de ácido. Ahora bien, este tipo directo y automático de respuesta es adecuado para una sola célula, pero significaría el caos para una agrupación de células. Cualquier organismo constituido por un cierto número de células debe tener un sistema que coordine sus respuestas. Sin tal sistema, sería semejante a una ciudad con personas recíprocamente incomunicadas y que actuaran en virtud de objetivos contrapuestos. Así, ya los celentéridos, los animales multicelulares más primitivos, tienen los rudimentos de un sistema nervioso. Podemos ver en ellos las primeras células nerviosas («neuronas»), células especiales con fibras que se extienden desde el cuerpo celular y que emiten ramas extraordinariamente finas.

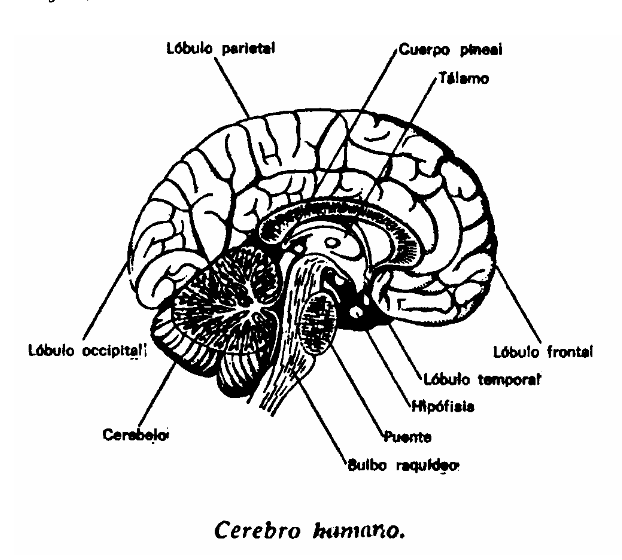
El funcionamiento de las células nerviosas es tan sutil y complejo que, incluso a este nivel simple, nos hallamos ya algo desbordados cuando intentamos explicar lo que realmente ocurre. De alguna manera aún no comprendida, un cambio en el medio ambiente actúa sobre la célula nerviosa. Puede tratarse de un cambio en la concentración de alguna sustancia, en la temperatura, en la cantidad de luz, o en el movimiento del agua, o bien puede entrar en contacto real con algún otro objeto. Cualquiera que sea el estímulo, la neurona emite un «impulso» que corre a lo largo de la fibra nerviosa; en el extremo de la fibra el impulso salta una delgada hendidura («sinapsis») y alcanza la próxima célula nerviosa; y de este modo se transmite de una célula a la siguiente. En el caso de un celentérido, tal como la medusa, el impulso es transmitido por todo el organismo. La medusa responde contrayendo alguna parte o la totalidad de su cuerpo. Si el estímulo es un contacto con una partícula de alimento, el organismo la incorpora por contracción de sus tentáculos.



Célula nerviosa.

Todo esto ocurre, por supuesto, de forma totalmente automática, pero, ya que representa una ventaja para la medusa, deseamos ver una finalidad en el comportamiento de este organismo. Realmente, el ser humano, como criatura que se comporta con vistas a la consecución de un objetivo, es decir, con una motivación, naturalmente tiende a atribuir una finalidad incluso a la naturaleza inanimada. Los científicos denominan a esta actitud «teleología», e intentan evitar cuanto pueden esa forma de pensar y hablar. Pero, al descubrir los resultados de la evolución, es tan conveniente hablar en términos del desarrollo hacia el logro de una mayor eficacia, que incluso los científicos, salvo los puristas más fanáticos, ocasionalmente caen en la teleología. (Los lectores de este libro ya habrán apreciado, por supuesto, que a menudo he incurrido en esta falta.) Sin embargo, permítasenos evitar la actitud teleológica, al considerar el desarrollo del sistema nervioso y del cerebro. La Naturaleza no ha ideado el cerebro; éste es el resultado de una larga serie de accidentes evolutivos, por así decirlo, que lograron producir caracteres que representaban una mejora en cada etapa y proporcionaban ventajas al organismo que los poseía. En la lucha por la supervivencia, un animal que sea más sensible a los cambios del medio ambiente que sus competidores, y pueda responder a ellos más deprisa, se verá favorecido por la selección natural. Si, por ejemplo, un animal

logró poseer una, mancha sobre su cuerpo que era excepcionalmente sensible a la luz, esta ventaja fue tan grande que la evolución hacia el desarrollo de manchas oculares, y eventual, mente de ojos, resultó ser la consecuencia inevitable.



Cerebro humano.

En los platelmintos comienzan a aparecer grupos especializados en células que forman «órganos de los sentidos» rudimentarios. Además, los platelmintos también muestran los rudimentos de un sistema nervioso que evita emitir indiscriminadamente impulsos nerviosos a través del cuerpo, pero que, en cambio, los transmite hasta los puntos críticos de respuesta. La estructura desarrollada que realiza esta función es una médula neutral central. Los platelmintos son los primeros que han desarrollado un «sistema nervioso central».

Esto no es todo. Los órganos de los sentidos de los platelmintos están localizados en su extremo cefálico, la primera parte de su cuerpo que se pone en relación con el medio ambiente cuando se desplaza, y así, naturalmente, la médula neural se halla particularmente bien desarrollada en la región cefálica. La pequeña masa desarrollada es el rudimento de un cerebro.

Gradualmente aparecen nuevos caracteres a medida que se incrementa la complejidad de los grupos. Los órganos de los sentidos aumentan en número y sensibilidad. La médula neural y sus ramas aumentan en complejidad, desarrollando un sistema extenso de células nerviosas aferentes, que conducen los mensajes hacia la médula neural, y eferentes, que transmiten los mensajes hacia los órganos de respuesta. Las agrupaciones o núcleos de células nerviosas en las vías de entrecruzamiento, en el seno cerebral, se hacen cada vez más complicadas. Las fibras nerviosas adquieren formas que pueden transportar los impulsos con mayor rapidez. En el calamar, el animal más ampliamente desarrollado de los no segmentados, esta rápida transmisión se logra gracias al aumento de espesor de la fibra nerviosa. En los animales segmentados, la fibra desarrolla una vaina de material lipídico («mielina»), que incluso es más eficaz para aumentar la velocidad del impulso nervioso. En el ser humano, algunas fibras nerviosas pueden transmitir el impulso a cien metros por segundo (aproximadamente 360 km por hora), mientras que esta velocidad es aproximadamente de solo 16 m por hora en algunos de los invertebrados.

Los cordados introducen un cambio radical en la localización de la médula neural. En ellos, este tronco nervioso principal (conocido mejor como médula espinal) corre a lo largo de la parte dorsal en vez de la ventral, que es lo que ocurre en todos los animales inferiores. Esto puede parecer un retraso —el situar la médula espinal en una región más expuesta—. Pero los vertebrados tienen la médula espinal bien protegida, en el interior de la columna ósea vertebral. La columna vertebral, aunque su primera función es la de proteger la médula espinal, produjo sorprendentes ventajas, pues sirvió como una visa sobre la que los cordados pudieron colgar masa y peso. Desde la columna vertebral pudieron extenderse las costillas, con las que se cierra el tórax, los maxilares, con los dientes para masticar, y los huesos largos que forman las extremidades.

El cerebro de los cordados se desarrolla a partir de tres estructuras, que ya se hallan presentes de una forma rudimentaria en los

vertebrados más primitivos. Estas estructuras, que al principio eran simples expansiones de tejido nervioso, son el «cerebro anterior», el «cerebro medio» y el «cerebro posterior», división señalada, por vez primera, por el anatomista griego Erasístrato de Quíos, aproximadamente 280 años a. de J.C. En el extremo cefálico de la médula espinal, ésta aumenta ligeramente de espesor y forma la parte posterior del cerebro conocida como «bulbo raquídeo». Por detrás de esta sección, en casi todos los cordados primitivos existe una extensión denominada el «cerebelo» («cerebro pequeño»). Por delante de éste se encuentra el cerebro medio. En los vertebrados inferiores, el cerebro medio se halla relacionado, sobre todo, con la visión y tiene un par de lóbulos ópticos, mientras que el cerebro anterior se halla relacionado con el olfato y el gusto y contiene los lóbulos olfatorios. El cerebro anterior, yendo de delante hacia atrás, se halla dividido en la sección de los lóbulos olfatorios, el «cerebro» y el «tálamo», cuya porción más inferior es el «hipotálamo». (El cerebro, palabra de origen latino, al menos en el ser humano, es la parte más grande e importante del órgano.) Eliminando el cerebro de animales y observando los resultados, el anatomista francés Marie-Jean-Pierre Flourens demostró, en 1824, que era precisamente el cerebro el responsable de la actividad intelectual y de la voluntad. El revestimiento del cerebro, denominado corteza cerebral, es el componente de más importancia. En los peces y anfibios, éste simplemente se halla representado por una delgada capa (denominada *pallium* o manto). En los reptiles aparece una nueva capa de tejido nervioso, llamado *neopallium* («manto nuevo»). Es el verdadero precursor de las estructuras que aparecen más tarde en el proceso evolutivo. Eventualmente se hace cargo del control de la visión y otras sensaciones. En los reptiles, el centro integrador para los mensajes visuales ya se ha desplazado, en parte, desde el cerebro medio al cerebro anterior; en las aves se completa esta traslación. Se extiende virtualmente por toda la superficie del cerebro. Al principio persiste como un delgado revestimiento, pero a medida que crece en los mamíferos superiores, su superficie se hace mucho mayor que la del cerebro, por lo que experimenta inflexiones o «circunvoluciones». Este plegamiento es responsable de la complejidad y capacidad del cerebro de los mamíferos superiores, en especial del ser humano.

A medida que se avanza en esta dirección del desarrollo de las especies, el cerebro adquiere una importancia cada vez mayor, llegando a constituir el principal componente del encéfalo. El cerebro medio o mesencéfalo se reduce considerablemente de tamaño. En el caso de los primates, en los que el sentido de la vista se ha perfeccionado a expensas del sentido del olfato, los lóbulos olfatorios del cerebro anterior se han reducido a simples bulbos. En esta fase evolutiva, el cerebro se ha extendido ya sobre el tálamo y el cerebelo. Incluso los primeros fósiles homínidos tenían encéfalos mucho mayores que los monos más evolucionados. Mientras que el cerebro del chimpancé o del orangután pesa menos de 400 g, y el gorila, de dimensiones mucho mayores que el ser humano, tiene un cerebro que pesa por término medio 540 g, el cerebro del *Pithecanthropus* pesaba unos 850 a 1.000 g, y éste fue un homínido «poco inteligente». El cerebro del hombre de Rhodesia pesaba unos 1.300 g; el cerebro del hombre del Neandertal y del moderno *Homo sapiens* pesaban unos 1.500 g. El mayor desarrollo mental del hombre moderno con respecto al hombre del Neandertal parece obedecer al hecho de que en el primero una mayor proporción de su cerebro se halla concentrada en las regiones anteriores de este órgano, que al parecer controlan los aspectos más superiores de la función mental. El hombre de Neandertal tenía frente estrecha, con la masa cerebral desplazada hacia las regiones posteriores del cráneo, mientras que, por el contrario, el hombre moderno, de frente despejada, muestra un mayor desarrollo de las regiones frontales del cerebro.

El cerebro del hombre moderno representa 1/50 parte de su peso corporal. Cada gramo de cerebro corresponde, por así decirlo, a 50 g de su organismo. En comparación, el cerebro del chimpancé pesa aproximadamente la 1/150 parte de su cuerpo y el de gorila cerca de 1/500 parte del peso de su organismo. En realidad, algunos de los primates más pequeños tienen un cociente

cerebro/cuerpo más elevado que el del ser humano. (Así ocurre también, por ejemplo, en los colibríes.) Un mono puede tener un cerebro que represente la 1/18 parte del peso de su cuerpo. Sin embargo, en este caso la masa de su cerebro es tan pequeña en términos absolutos, que no puede contener la necesaria complejidad para manifestar la inteligencia del ser humano. En resumen, lo que es necesario, es lo que el ser humano tiene, un cerebro que es grande en términos absolutos y en relación con el tamaño de su organismo.

Esto se hace evidente con más claridad en el hecho de que dos tipos de mamíferos poseen cerebros que son mucho mayores que el ser humano y que, no obstante, no confieren a esos mamíferos una inteligencia superior. Los elefantes más grandes pueden tener cerebros de hasta 6.000 g y las ballenas más grandes pueden poseer cerebros de hasta 9.000 g. No obstante, el tamaño de los cuerpos que deben ser gobernados por estos cerebros es enorme. El cerebro del elefante, a pesar de su tamaño, sólo representa la 1/1.000 parte del peso de su cuerpo, mientras que el cerebro de una ballena grande puede representar sólo la 1/10.000 parte del peso de su cuerpo.

No obstante, sólo en una dirección tiene el ser humano un posible rival. Los delfines y las marsopas, pequeños miembros de la familia de los cetáceos, tienen posibilidades de emular al hombre. Algunos de estos animales no pesan más que un ser humano y, sin embargo, sus cerebros son mayores (con pesos de hasta 1.700 g) y con más circunvoluciones.

Pero, a partir de este solo hecho, no puede llegarse a la conclusión de que el delfín sea más inteligente que el ser humano, por cuanto debe considerarse, además, la cuestión de la organización interna del cerebro. El cerebro del delfín (al igual que el del hombre del Neandertal) puede estar más orientado en la dirección de lo que podemos considerar las «funciones inferiores».

La única manera segura de poder establecerlo es intentar medir experimentalmente la inteligencia del delfín. Algunos investigadores, principalmente John C. Lilly, parecen estar convencidos de que la inteligencia del delfín es comparable a la nuestra, que los delfines y las marsopas tienen un tipo de lenguaje tan complicado como el nuestro, y que posiblemente pueden haber establecido una forma de comunicación interespecífica.

Incluso aunque esto sea así, está fuera de toda duda que los delfines, aunque inteligentes, perdieron la oportunidad de aplicar su inteligencia al control del medio ambiente cuando se readaptaron a la vida marina. Es imposible hacer uso del fuego bajo el agua, y fue el descubrimiento del uso del fuego lo que diferenció por vez primera a la Humanidad de todos los demás organismos. Más fundamental todavía, la locomoción rápida a través de un medio tan viscoso como el agua requiere una forma aerodinámica. Esto ha hecho imposible en el delfín el desarrollo del cualquier equivalente del brazo y la mano humanos, con los que el medio ambiente puede ser delicadamente investigado y manipulado.

Al menos por lo que respecta a la inteligencia eficaz, el *Homo sapiens* carece de parangón en la Tierra en la que vive actualmente y, por lo que sabemos, en el pasado.

Mientras consideramos la dificultad que supone determinar el nivel preciso de inteligencia de una especie tal como el delfín, vale la pena decir que no existe un método completamente satisfactorio para medir el nivel exacto de inteligencia de miembros individuales de nuestra propia especie.

En 1904, los psicólogos franceses Alfred Binet y Théodore Simon idearon medios para estudiar la inteligencia en función de las respuestas dadas a preguntas juiciosamente seleccionadas. Tales «tests de inteligencia» dieron origen a la expresión «cociente intelectual» (o «CI»), que representa el cociente entre la edad mental, medida por la prueba, y la edad cronológica; este cociente es multiplicado por 100 para eliminar los decimales. El vulgo ha llegado a conocer la importancia del CI principalmente a través de la labor del psicólogo americano Lewis Madison Terman.

El problema radica en que no se ha ideado ningún test independiente de una determinada cultura. Preguntas sencillas sobre arados pueden resultar chocantes para un muchacho inteligente de ciudad, y cuestiones simples sobre escaleras

rodantes pueden igualmente confundir a un muchacho inteligente educado en un ambiente rural. Ambas pueden desconcertar a un aborigen australiano igualmente inteligente, que, sin embargo, podría plantearnos preguntas acerca de bumerangs que nos dejarían perplejos.
Otro test familiar tiene como misión explorar un aspecto de la mente aún más sutil y huidizo que la inteligencia. Consiste en una serie de figuras hechas con tinta, creadas por vez primera por un médico suizo, Hermann Rorschach, entre 1911 y 1921. Se le pide a la persona que se va a examinar que convierta estas manchas de tinta en imágenes; del tipo de imagen que una persona construye en la «prueba de Rorschach» se deducen conclusiones acerca de su personalidad. Sin embargo, incluso en el mejor de los casos, es probable que tales conclusiones no sean del todo concluyentes.
Sorprendentemente, muchos de los filósofos de la Antigüedad desconocieron casi por completo la significación del órgano situado en el interior del cráneo humano. Aristóteles consideró que el cerebro era simplemente una especie de dispositivo de acondicionamiento de aire, por así decirlo, cuya función sería la de enfriar la sangre excesivamente caliente. En la generación que siguió a la de Aristóteles, Herófilo de Chacedón, investigando al respecto en Alejandría, reconoció correctamente que el cerebro era el asiento de la inteligencia, pero, como era usual, los errores de Aristóteles tenían más peso que las verdades de otros.
Por tanto, los pensadores antiguos y medievales tendieron a menudo a localizar las emociones y la personalidad en órganos tales como el corazón, el hígado y el bazo (de ahí las expresiones «con el corazón destrozado», «descarga su bilis», y otras similares).
El primer investigador moderno del cerebro fue un médico y anatomista inglés del siglo XVII, llamado Thomas Willis; describió el trayecto seguido por los nervios hasta el cerebro. Posteriormente, un anatomista francés llamado Felix Vicq d'Azyr y otros bosquejaron la anatomía del cerebro, pero no fue hasta el siglo XVIII cuando un fisiólogo suizo, Albrecht von Haller, efectuó el primer descubrimiento crucial sobre el funcionamiento del sistema nervioso, Von Haller halló que podía determinar la contracción de un músculo mucho más fácilmente cuando estimulaba el nervio, que cuando era el músculo el estimulado. Además, esta contracción era involuntaria; incluso podía producirla estimulando el nervio después que el organismo hubiera muerto. Seguidamente, Von Haller señaló que los nervios conducían sensaciones. Cuando seccionaba los nervios de tejidos específicos, éstos ya no podían reaccionar. El fisiólogo llegó a la conclusión que el cerebro recibía sensaciones a través de los nervios y luego enviaba, de nuevo a través de los nervios, mensajes que provocaban respuestas tales como la contracción muscular, Supuso que todos los nervios se unían en el centro del cerebro. En 1811, el médico austríaco Franz Joseph Gall llamó la atención sobre la «sustancia gris» en la superficie del cerebro (que se distingue de la «sustancia blanca» en que ésta consta simplemente de las fibras que proceden de los cuerpos de las fibras nerviosas, siendo estas fibras de color blanco debido a sus vainas de naturaleza grasa). Gall sugirió que los nervios no se reunían en el centro del cerebro, como había supuesto Von Haller, sino que cada uno de ellos corría hasta una determinada región de la sustancia gris, que él consideró el área coordinadora del cerebro. Gall opinaba que diferentes zonas de la corteza cerebral tenían la misión de recibir sensaciones procedentes de distintos lugares del organismo y también de enviar mensajes a zonas específicas que provocaran respuestas.
Si una parte específica de la corteza era responsable de una propiedad específica de la mente, lo más natural era suponer que el grado de desarrollo de aquella parte reflejaría el carácter o mentalidad de la persona. Mediante la búsqueda de protuberancias en el cráneo de una persona, podría determinarse si esta o aquella porción del cerebro estaba aumentada y así juzgarse si dicha persona era particularmente generosa o depravada o poseía un carácter especial. Siguiendo esta forma de pensar, algunos de los seguidores de Gall fundaron la seudociencia de la «frenología», que estuvo bastante en boga en el siglo XIX y que, en realidad, aún no ha muerto hoy día. (Sorprendentemente, aunque Gall y sus

seguidores señalaron que la frente alta y la cabeza redonda eran signos de inteligencia —un punto de vista que todavía influye en la opinión de las gentes— el propio Gall tuvo un cerebro desusadamente pequeño, casi un 15 % inferior al promedio.) Pero el hecho de que la frenología, tal como la desarrollaron los charlatanes, carezca de sentido, no significa que la idea original de Gall, de la especialización de funciones en zonas particulares de la corteza cerebral, fuera errónea. Incluso antes de que se realizaran estudios específicos del cerebro, se observó que la lesión de una porción particular del cerebro podía dar lugar a una afección particular. En 1861, el cirujano francés Pierre-Paul Broca, mediante un cuidadoso estudio *post mortem* del cerebro, demostró que los pacientes con «afasia» (la incapacidad para hablar o comprender el lenguaje) por lo general presentaban la lesión física de un área particular del cerebro izquierdo, un área llamada «circunvolución de Broca» a consecuencia de ello. Luego, en 1870, dos científicos alemanes, Gustav Fritsch y Eduard Hitzig, empezaron a localizar las funciones de supervisión del cerebro por estimulación de varias zonas de él y observación de los músculos que respondían. Varios años más tarde, esa técnica fue considerablemente perfeccionada por el fisiólogo suizo Walter Rudolf Hess, que compartió (con Egas Moniz) el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1949 por este trabajo.

Con tales métodos se descubrió que una banda específica de la corteza se hallaba particularmente implicada en la estimulación de los diversos músculos voluntarios. Por tal motivo, esta banda se denomina «área motora». Al parecer, presenta una relación invertida con respecto al cuerpo; las porciones más superiores del área motora, hacia la parte superior del cerebro, estimulan las partes más inferiores de la pierna; cuando se avanza hacia abajo en el área motora, son estimulados los músculos más proximales de la pierna, luego los músculos del tronco, después los del brazo y la mano y, finalmente, los de la nuca y la mano.

Detrás del área motora existe otra zona de la corteza que recibe muchos tipos de sensaciones y que, por este motivo, fue denominada «área sensitiva». Como en el caso del área motora, las regiones del área sensitiva en la corteza cerebral se hallan divididas en secciones que parecen dispuestas inversamente con respecto al organismo. Las sensaciones procedentes del pie alcanzan la parte superior del área, sucesivamente, a medida que vamos hacia abajo, llegan al área las sensaciones procedentes de la pierna, cadera, tronco, nuca, brazo, mano y dedos y, por último, de la lengua. Las secciones del área sensitiva relacionadas con los labios, lengua y la mano son (como era de esperar) mayores, en proporción al tamaño real de aquellos órganos, que lo son las secciones correspondientes a otras partes del cuerpo.

Si a las áreas motora y sensitiva se les añaden aquellas secciones de la corteza cerebral que primariamente reciben las impresiones procedentes de los principales órganos de los sentidos, los ojos y los oídos, todavía queda una porción importante de la corteza sin una función claramente asignada y evidente.

Esta aparente falta de asignación ha dado origen a la afirmación corriente de que el ser humano sólo usa una quinta parte de su cerebro. Por supuesto, esto no es así; lo que realmente podemos decir es que una quinta parte del cerebro del ser humano tiene una función evidente. Del mismo modo podríamos decir que una empresa constructora de rascacielos está usando sólo la quinta parte de sus, empleados, debido a que precisamente esta quinta parte es realmente la que se halla colocando el armazón de acero, los cables eléctricos, transportando el equipo, etcétera. Se ignoraría entonces a los ejecutivos, secretarias, oficinistas, supervisores y otros empleados. De forma análoga, la porción más importante del cerebro se halla dedicada a lo que podríamos llamar una «labor administrativa», recopilando los datos de naturaleza sensorial, analizándolos, decidiendo qué es lo que debe ignorarse, qué es lo que debe modificarse y exactamente cómo debe modificarse. La corteza cerebral tiene «áreas de asociación», algunas para las sensaciones auditivas, otras para las sensaciones visuales y otras para otros tipos de sensaciones.

Cuando se tienen en cuenta todas estas áreas de asociación, todavía persiste un área del cerebro que no tiene una función específica y fácil de definir. Ésta es la situada exactamente por

detrás de la frente, que ha sido denominada «lóbulo prefrontal». Su evidente falta de función es tal que por ello se ha denominado algunas veces «área silenciosa». Ciertos tumores han exigido eliminar áreas importantes del lóbulo prefrontal, sin que se observe un efecto significativo particular en el individuo; pero, con toda seguridad, no es una masa inútil de tejido nervioso. Incluso puede suponerse que es la porción más importante del cerebro, si se considera que en el desarrollo del sistema nervioso humano ha tenido lugar un aumento continuo de la complejidad de su extremo más anterior. Por tanto, el lóbulo prefrontal puede ser el área del cerebro más recientemente evolucionada y más significativamente humana.

En la década de 1930, un cirujano portugués, Antonio Egas Moniz, pensó que, cuando un enfermo mental dejaba de responder a los tratamientos conocidos, aún era posible ayudarle realizando la drástica intervención de seccionar los lóbulos prefrontales, separándolos del resto del cerebro. De esta manera podría aislarse al paciente de una serie de asociaciones que había elaborado y que, al parecer, la estaban afectando de forma adversa; así se le permitiría reiniciar una nueva y mejor existencia con el cerebro restante. Esta operación, la «lobotomía prefrontal», fue realizada por vez primera en 1935; en una serie de casos parecía realmente aliviar. Moniz compartió (con W. R. Hess) el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1949, por este trabajo. No obstante, la operación nunca alcanzó popularidad y ahora es más impopular que nunca. Muy a menudo, la cura es literalmente peor que la enfermedad.

El cerebro se halla dividido en dos «hemisferios cerebrales», conectados por un puente de sustancia blanca denso, «el cuerpo calloso».

En efecto, los hemisferios son órganos separados, unidos por fibras nerviosas que cruzan el cuerpo calloso y coordinan ambas partes. A pesar de esto, los hemisferios siguen siendo potencialmente independientes.

La situación es algo similar a la de nuestros ojos. Nuestros ojos actúan como una unidad corrientemente, pero si se pierde un ojo, el otro puede cubrir nuestras necesidades. De forma similar, la supresión de uno de los hemisferios cerebrales no convierten en descerebrado a un animal de experimentación. El hemisferio restante aprende a desenvolverse.

Usualmente, cada hemisferio es en gran parte responsable de un lado particular del organismo; el hemisferio cerebral izquierdo, del lado derecho; el hemisferio cerebral derecho, del lado izquierdo. Si ambos hemisferios se hallan en su lugar y se secciona el cuerpo calloso, se pierde la coordinación y las dos mitades del cuerpo actúan bajo un control más o menos independiente. En realidad, se crea un caso de cerebros gemelos.

Los monos pueden ser tratados de esa forma (con una operación sobre el nervio óptico, para asegurarse de que cada ojo se halla conectado sólo a un hemisferio), y, cuando se realiza esto, cada ojo puede ser entrenado por separado para tareas particulares. Un mono puede ser entrenado a seleccionar una cruz sobre un círculo, que indicará, digamos, la presencia de alimento. Si sólo se mantiene abierto el ojo izquierdo durante el período de entrenamiento, únicamente este ojo será de utilidad al respecto. Si se mantiene abierto el ojo derecho y se cubre el ojo izquierdo, el mono no tendrá la memoria del entrenamiento efectuado mediante el ojo derecho. Tendrá que obtener su alimento por el procedimiento de ensayo y error.

Si se entrenan los dos ojos en tareas contradictorias y si ambos se abren, el mono alternará sus actividades, a medida que los hemisferios intervengan.

Naturalmente, en una situación de este tipo, en la que los dos hemisferios ejercen un control, existe siempre el peligro de conflicto y confusión. Para evitar esto, un hemisferio cerebral (casi siempre el izquierdo en los seres humanos) es el dominante, cuando ambos se hallan normalmente conectados. La circunvolución de Broca, que controla el lenguaje, se halla, por ejemplo, en el hemisferio izquierdo. El «área gnóstica», que es un área de asociación, una especie de tribunal supremo, se halla también en el hemisferio izquierdo. Ya que el hemisferio cerebral izquierdo controla la actividad motora de la mano derecha del

cuerpo, no es sorprendente que la mayoría de las personas utilicen perfectamente esta mano (aunque incluso los zurdos tienen un hemisferio cerebral izquierdo dominante). Cuando no existe una dominancia claramente establecida entre el lado derecho y el izquierdo, la persona es ambidextra, es decir, que utiliza tanto, la mano derecha como la izquierda, presenta algunas dificultades de lenguaje y quizás una cierta torpeza manual.

La corteza cerebral no constituye la totalidad del cerebro. Existen áreas de sustancia gris bajo la corteza cerebral. Son los denominados «núcleos de la base»; forma parte de ellos un grupo denominado el «tálamo». El tálamo actúa como centro de recepción de diversas sensaciones. Las más violentas de éstas, como el dolor, el calor intenso o el frío extremado, o un sonido intenso, son filtradas a este nivel. Sensaciones de menor intensidad, procedentes de los músculos —tacto suave, temperaturas moderadas— pasan al área sensitiva de la corteza cerebral. Se supone que las sensaciones suaves pueden alcanzar la corteza cerebral, donde pueden ser sometidas a examen y donde es posible se desencadene la reacción después de un intervalo más o menos prolongado de tiempo. Sin embargo, las sensaciones burdas, que deben ser tratadas con rapidez y para las que no se dispone de tiempo para examinarlas, son elaboradas más o menos automáticamente en el tálamo.

Por debajo del tálamo se encuentra el «hipotálamo», centro de una serie de dispositivos que controlan el organismo. El centro tiófico del cuerpo, mencionado en el capitulo XIV, que controla la nutrición, se halla localizado en el hipotálamo; también se encuentra en él el centro que controla la temperatura del organismo. Además, es a través del hipotálamo como el cerebro ejerce alguna influencia sobre la glándula pituitaria (véase el capítulo XIV); esto es, un ejemplo de la manera como los controles nerviosos del organismo y los controles químicos (las hormonas) pueden estar unificados a un nivel supervisor superior.

En 1954, el fisiólogo James Olds descubrió otra función, más bien aterradora, del hipotálamo. Contiene una región que, cuando se estimula, aparentemente da origen a una sensación sumamente placentera. Un electrodo fijado en el centro del placer de una rata, dispuesto de tal forma que puede ser estimulado por el propio animal, permite estimularlo hasta ocho mil veces en una hora durante varias horas o días, de tal forma que el animal no se hallará interesado en la ingestión de alimento, las relaciones sexuales y el sueño. Evidentemente, todas las cosas deseables en la vida lo son sólo en la medida en que estimulan el centro del placer. Cuando se logra estimularlo directamente, todo lo demás resulta innecesario.

El hipotálamo también contiene un área relacionada con el ciclo de vigilia-sueño, ya que la lesión de algunas de sus partes induce un estado similar al sueño en los animales. El mecanismo exacto por el cual el hipotálamo realiza su función es incierto. Una teoría es que envía señales a la corteza, que a su vez emite señales en respuesta a aquéllas, de forma que ambas estructuras se estimulan mutuamente. Al proseguir el estado de vigilia, la coordinación entre ellas comienza a fallar, las oscilaciones se hacen irregulares y el individuo se vuelve somnoliento. Un violento estímulo (como un ruido intenso, una sacudida persistente de los hombros o, por ejemplo, también la interrupción brusca de un ruido continuo) despertará a la persona dormida. En ausencia de tales estímulos, se restituirá eventualmente la coordinación entre el hipotálamo y la corteza, y el sueño cesará espontáneamente; o quizás el sueño se hará tan superficial que un estímulo ordinario, del que hay abundancia en el medio ambiente, bastará para despertarlo.

Durante el sueño tendrá lugar una actividad onírica —datos sensoriales más o menos apartados de la realidad—. El sueño es un fenómeno aparentemente universal; las personas que dicen dormir sin soñar, simplemente es que no logran recordar los sueños. El fisiólogo americano W. Dement, mientras estudiaba a personas durmiendo, apreció períodos de movimientos rápidos de los ojos, que algunas veces persistían durante varios minutos (REM). Si el individuo que dormía era despertado durante esos períodos, por lo general decía recordar un sueño. Además, si era constantemente importunado durante esos períodos, empezaba a sufrir trastornos psíquicos; estos trastornos se multiplicaban

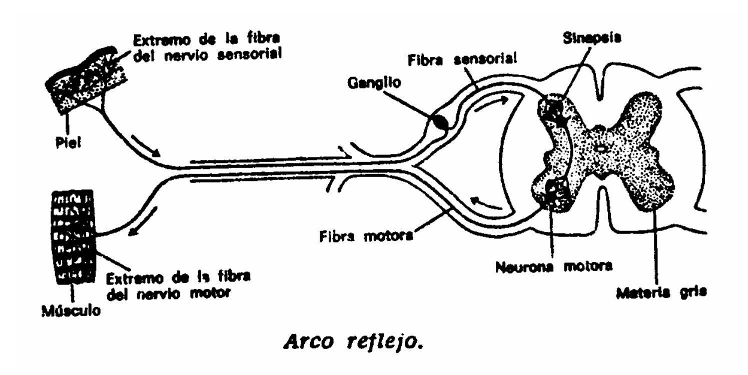
durante las noches sucesivas, como si el individuo intentara volver a tener el sueño perdido.
Por tanto, parece que la actividad onírica desempeña una importante función en la actividad del cerebro. Se ha sugerido que, gracias a los sueños, el cerebro revisa los sucesos del día, para eliminar lo trivial y reiterativo que, de otro modo, podría confundirle y reducir su eficacia. El sueño es el período natural en el que se desarrolla esa actividad, pues entonces el cerebro no debe realizar muchas de las funciones de vigilancia. La imposibilidad de realizar esta tarea (debido a la interrupción) debe afectar tanto a la actividad cerebral, que este órgano debe intentar realizar la inacabada tarea durante los periodos de vigilia, produciendo alucinaciones (es decir sueños cuando el individuo está despierto) y otros síntomas desagradables. Naturalmente, sería sorprendente que ésta no fuera una de las funciones principales del sueño, ya que es muy escaso el reposo físico durante el sueño que no pueda conseguirse en el curso de una vigilia tranquila.
El sueño REM también se da en niños, que pasan así la mitad del tiempo en que duermen y de los cuales resulta difícil suponer que posean motivaciones para soñar. Puede ser que el sueño REM mantenga el desarrollo del sistema nervioso. (Ha sido observado en otros mamíferos, aparte el hombre.) Por debajo y detrás del cerebro se encuentra el cerebelo, más pequeño (dividido también en dos «hemisferios cerebelosos»), y el «tallo cerebral», que se hace cada vez más estrecho y se continúa, sin modificaciones aparentes del diámetro, con la «médula espinal», que se extiende cerca de cuarenta y cinco centímetros hacia abajo, por el centro hueco de la columna vertebral.
La médula espinal consiste de sustancia gris (en el centro) y sustancia blanca (en la periferia); a ellas se unen una serie de nervios, que se dirigen en su mayor parte a los órganos internos —corazón, pulmones, aparato digestivo, etc.— órganos que se hallan más o menos sometidos a control involuntario.
En general, cuando resulta seccionada la médula espinal, por una enfermedad o un traumatismo, la parte del cuerpo situada por debajo del segmento lesionado se halla, digamos, desconectada. Pierde la sensibilidad y está paralizada. Si la médula es seccionada en la región de la nuca, la muerte tiene lugar debido a que se paraliza el tórax y, con ello, la actividad pulmonar. Por este motivo resulta fatal el «desnucamiento», y ahorcar es una forma fácil de ejecución. Es la sección de la médula, más que la rotura de un hueso, la que tiene consecuencias fatales.
La estructura completa del «sistema nervioso central», que consiste de cerebro, cerebelo, tallo cerebral y médula espinal, se halla cuidadosamente coordinada. La sustancia blanca en la médula espinal está constituida de haces de fibras nerviosas que corren en sentido ascendente y descendente, dando unidad a todo el sistema. Las fibras que conducen los impulsos en sentido descendente, desde el cerebro, son las «vías descendentes» y aquellas que conducen a los impulsos hacia arriba, o sea hacia el cerebro, constituyen la «vías ascendentes».
En 1964, los investigadores especializados del «Cleveland's Metropolitan General Hospital» informaron haber conseguido aislar los cerebros de varios Rhesus y mantenerlos vivos independientemente durante dieciocho horas. Ahí se ofrece la posibilidad de estudiar con detalle el metabolismo del cerebro mediante una comparación entre el medio nutricio cuando entra en los vasos sanguíneos del cerebro aislado y ese mismo medio a la salida.
Al año siguiente se trasplantaron cabezas de perro a los cuellos de otros perros enlazándolas con el sistema circulatorio del cuerpo receptor; se consiguió mantener vivos los cerebros de las cabezas trasplantadas, así como hacerles funcionar durante dos días. En 1966 se conservaron varios cerebros de perro a temperaturas próximas al punto de congelación durante seis horas, y luego fueron reanimados hasta que aparecieron claros indicios de actividad normal tanto química como eléctrica. Evidentemente, el cerebro es mucho más resistente de lo que parece.

Acción Nerviosa

No son sólo las diversas porciones del sistema nervioso central las que se hallan unidas entre sí por nervios, sino todo el organismo, que de esta manera se halla sometido al control de ese sistema.
Los nervios relacionan entre sí los músculos, las glándulas y la piel; incluso invaden la pulpa de los dientes (como sabemos por propia experiencia con ocasión de un dolor de muelas).
Los nervios fueron observados ya en tiempos antiguos, pero no se comprendió ni su estructura ni su función.
Hasta los tiempos modernos, se consideró que eran huecos y servían para el transporte de un fluido sutil. Teorías un tanto complicadas, desarrolladas por Galeno, implicaban la existencia de tres fluidos distintos, transportados por las venas, las arterias y los nervios, respectivamente. El fluido de los nervios, por lo general llamado «fluido animal», es el más sorprendente de los tres. Cuando Galvani descubrió que los, músculos y los nervios podían ser estimulados por una descarga eléctrica, esto permitió el desarrollo de una serie de estudios que eventualmente mostraron que la acción nerviosa estaba asociada con la electricidad, también un sutil fluido, más sutil de lo que Galeno habría podido imaginar.
Los trabajos específicos sobre la acción nerviosa fueron iniciados, a principios del siglo XIX, por el fisiólogo alemán Johannes Peter Müller, quien, entre otras cosas, demostró que los nervios sensitivos siempre producían el mismo tipo de sensaciones, independientemente de la naturaleza del estímulo. Así, el nervio óptico registraba un destello de luz, tanto si era estimulado por la propia luz como si lo era por la presión mecánica de un puñetazo en el ojo (en este último caso, la persona afectada vería «estrellas»). Este hecho pone de relieve que nuestro contacto con el mundo no es un contacto con la realidad en términos absolutos, sino un contacto con estímulos especializados que el cerebro interpreta, por lo general, de una manera útil, pero que puede interpretar también de una forma inútil.
El estudio del sistema nervioso experimentó un avance considerable en 1873, cuando un fisiólogo italiano, Camillo Golgi, desarrolló una tinción celular que implicaba el empleo de sales de plata y que era adecuada para reaccionar con las células nerviosas, poniendo de manifiesto sus más finos detalles. Fue capaz de demostrar, de esta manera, que los nervios estaban constituidos por células separadas e independientes, y que los procesos de una célula podían aproximarse mucho a los de otra, pero sin unirse con ellos. El tenue espacio entre ellas constituía la denominada sipnasis. De esta manera. Golgi apoyó sobre una base sólida las afirmaciones de un anatomista alemán, Wilhelm von Waldeyer, de que el sistema nervioso se componía en su totalidad de células nerviosas individuales o neuronas (denominándose a esta hipótesis la «teoría de la neurona»).
Sin embargo, el propio Golgi no fue partidario de la teoría de la neurona. Fue el neurólogo español Santiago Ramón y Cajal, quien, hacia 1889, utilizando un método de tinción que representaba un perfeccionamiento del de Golgi, entre las células en la sustancia gris del cerebro y de la médula espinal estableció de forma definitiva la teoría de las neuronas. Golgi y Ramón y Cajal, aunque divergían acerca de diversos detalles de sus hallazgos, compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1906.
Estos nervios forman dos sistemas: el «simpático y el parasimpático». (Los términos tienen su origen en los conceptos semimísticos de Galeno.) Ambos sistemas actúan casi siempre sobre cualquier organismo interno, ejerciendo un control a través de sus efectos opuestos. Por ejemplo, los nervios simpáticos aceleran los latidos cardíacos, los nervios parasimpáticos los hacen, más lentos; los nervios simpáticos disminuyen la secreción de jugos gástricos; los parasimpáticos estimulan tales secreciones, y así sucesivamente. Por tanto, la médula espinal, junto con otras porciones subcerebrales del encéfalo, regula la actividad de los órganos de una manera automática. Esta serie de controles involuntarios fueron investigados con detalle por el fisiólogo británico John Newport Langley, en la década de 1890, y los denominó «sistema nervioso autónomo o vegetativo».
Hacía 1830, el fisiólogo inglés Marshall Hall estudió otro tipo de comportamiento que parecía ser en cierto modo voluntario, pero

que resultó ser totalmente involuntario. Cuando accidentalmente se toca con la mano un objeto caliente, ésta se retira de forma instantánea. Si la sensación de calor tuviera que llegar hasta el cerebro, ser considerada e interpretada allí y provocar en este nivel el apropiado mensaje hacia la mano, ésta ya se habría chamuscado cuando dicho mensaje hubiera sido recibido. La médula espinal, no pensante, realiza toda esta tarea de forma automática y mucho más de prisa. Hall dio el nombre de «reflejo» a este proceso.

El reflejo tiene lugar a través de dos o más nervios, que actúan de forma coordinada constituyendo un «arco reflejo». El arco reflejo más simple posible es el que consta de dos neuronas, una sensitiva (que aporta sensaciones al «centro reflejo» en el sistema nervioso central, por lo general en algún punto de la médula espinal) y otra motora (que transmite instrucciones para el movimiento desde el sistema nervioso central). Las dos neuronas pueden hallarse conectadas por una o más «neuronas intercalares». Un estudio particular de tales arcos reflejos y de su función en el organismo fue realizado por el neurólogo inglés Charles Scott Sherrington, que compartió (con Adrian) el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1932, como consecuencia de ello. Sherrington, en 1897, ideó el término «sinapsis».



Arco reflejo.

Los reflejos dan lugar a una respuesta tan rápida y exacta a un estímulo particular, que ofrecen un método sencillo para comprobar la integridad general del sistema nervioso. Un ejemplo familiar lo constituye el «reflejo patelar» o, como usualmente se conoce, reflejo rotuliano. Cuando se cruzan las piernas, un golpe repentino por debajo, de la rodilla, en la parte superior de la pierna, determina una sacudida de la misma, un movimiento de puntapié; hecho puesto de manifiesto, por vez primera, en 1875, por el neurólogo alemán Carl Friedrich Otto Westphal, que llamó la atención sobre su importancia médica. El reflejo rotuliano no tiene importancia en sí mismo, pero su ausencia puede suponer la existencia de algún trastorno grave que afecte a la porción del sistema nervioso en la que se encuentra el arco reflejo.

Algunas veces, la lesión de una parte del sistema nervioso central determina la aparición de un reflejo anormal. Si se rasca la planta del pie, el reflejo normal determina que los dedos del pie se aproximen unos a otros y se dirijan hacia abajo. Ciertos tipos de lesión del sistema nervioso central motivarán que el dedo gordo del pie se dirija hacia arriba en respuesta a este estímulo, y que los dedos se separen y se dirijan hacia abajo. Éste es el «reflejo de Babinski», llamado así en honor al neurólogo francés Joseph-F.-F. Babinski, que lo describió en 1896.

En el ser humano, los reflejos están decididamente subordinados a la voluntad consciente. Podemos obligar a nuestra mano a que permanezca en el fuego; deliberadamente puede acelerarse la respiración cuando la acción refleja ordinaria la mantendría lenta, etc. Por otra parte, los animales inferiores no sólo se hallan mucho más estrictamente controlados por sus reflejos, sino que también los han desarrollado mucho más.

Uno de los mejores ejemplos lo constituye una araña tejiendo su red. Aquí, los reflejos producen un tipo tan elaborado de comportamiento, que es difícil pensar que simplemente se trata de una actividad refleja; por este motivo se lo ha denominado en general «comportamiento instintivo». (Debido a que la palabra «instintivo» se utiliza a menudo erróneamente, los biólogos prefieren el término «comportamiento innato».) La araña nace con un sistema nervioso en el que las conexiones han sido, por así decirlo, preestablecidas. Un estímulo particular desencadena el que la araña teja la tela, y cada acto en el proceso actúa a su vez

como estímulo que determina la respuesta siguiente. Cuando se mira la intrincada tela de una araña, tejida con una maravillosa precisión y eficacia para la función que debe realizar, es casi imposible creer que dicha tela no haya sido realizada por una inteligencia con un propósito bien definido. Pero el mismo hecho de que esta compleja tarea sea realizada tan perfectamente y de una forma tan exacta en todo momento, demuestra que la inteligencia no tiene nada que ver con ella. La inteligencia consciente, con las vacilaciones y el enjuiciamiento de las alternativas que son inherentes al pensamiento deliberado, inevitablemente dará origen a imperfecciones y variaciones de una construcción a otra.

Al aumentar la inteligencia, los animales tienden, cada vez más a despojarse de los instintos y las aptitudes congénitas. Sin lugar a dudas, de alguna manera pierden parte de su valor. Una araña puede tejer a la perfección su tela sorprendentemente compleja desde el primer momento, aún cuando nunca haya visto tejer una tela de araña o incluso una tela cualquiera. Por el contrario, el ser humano nace casi totalmente desprovisto de aptitudes y completamente indefenso. Un niño recién nacido puede chupar automáticamente un pezón, llorar si está hambriento y agarrarse si se va a caer, pero apenas si puede hacer algo más. Todo padre sabe cuán dolorosamente y con cuánto trabajo aprende un niño las formas más simples del comportamiento adecuado, y, no obstante, una araña o un insecto, aunque perfectamente dotado para realizar una determinada tarea, no puede introducir ninguna modificación. La araña construye una tela maravillosa, pero si esta tela no cumpliera su función, no podría aprender a construir otro tipo de tela. En cambio, un muchacho obtiene grandes beneficios de no haber sido dotado con una perfección congénita. Debe aprender lentamente y obtener sólo resultados imperfectos en el mejor de los casos; pero puede realizar una tarea imperfecta con el método por él elegido. Lo que el hombre ha perdido en aptitud y seguridad, lo ha ganado en una casi ilimitada flexibilidad.

Sin embargo, trabajos recientes subrayan el hecho de que no siempre existe una clara diferenciación entre el instinto y el comportamiento aprendido. Por ejemplo, por simple observación parece como si los polluelos o los patitos, recién salidos del huevo, siguieran a sus madres por instinto. Una observación más atenta muestra que no es así.

El instinto no es seguir a la madre, sino simplemente seguir a algo de una forma o color o movimiento característicos. Cualquier objeto que proporcione esta sensación en un cierto período de la temprana vida, es seguido por la criatura y seguidamente aceptado como la madre. Puede ser realmente la madre; y casi invariablemente lo es en realidad. Pero no precisa serlo. En otras palabras, el seguir a la madre es casi instintivo, pero se aprende que es la «madre» seguida. (Gran parte de la base experimental de estas concepciones fue aportada por el naturalista austríaco Konrad Z. Lorenz, que en el curso de los estudios realizados hace unos treinta años fue seguido, aquí y allá, por una manada de gansos.) El establecimiento de un determinado tipo de comportamiento, en respuesta a un estímulo particular que ha incidido en un cierto momento de la vida, se denomina «período crítico». En los polluelos, el período crítico de «impresión de la madre» se encuentra entre las 13 y 16 horas de haber salido del huevo. Para un perrito, el período crítico se halla entre las 3 y 7 semanas, durante las cuales los estímulos que es probable que incidan sobre él impriman varios aspectos de lo que nosotros llamamos el comportamiento normal del perro.

La impresión es la forma más primitiva del comportamiento aprendido; es un comportamiento tan automático, que tiene lugar en un tiempo tan limitado y sometido a una serie tan general de condiciones, que es fácil confundirlo con un instinto.

Una razón lógica que explica el fenómeno de la impresión es que permite una cierta flexibilidad deseable. Si un polluelo naciera con la capacidad instintiva de distinguir a su verdadera madre y sólo siguiera a ella, y si por cualquier motivo la verdadera madre estuviera ausente el primer día de vida del polluelo, esta criatura se encontraría indefensa. Por tanto, la maternidad se halla sujeta al azar durante unas pocas horas, y el polluelo puede resultar

impreso por cualquier gallina de la vecindad y así seguir a una madre adoptiva.

Como se ha indicado anteriormente, fueron las experiencias de Galvani, poco antes del comienzo del siglo XIX, las que indicaron por primera vez alguna relación entre la electricidad y la actividad del músculo y el nervio.

Las propiedades eléctricas del músculo condujeron a una aplicación médica sorprendente, gracias a la labor del fisiólogo holandés Willem Einthoven. En 1903 desarrolló un galvanómetro extraordinariamente sensible, tanto que respondía a las pequeñas fluctuaciones del potencial eléctrico del corazón que late. Hacia 1906, Einthoven registró las deflexiones de este potencial (denominándose el registro «electrocardiograma») y las correlacionó con diversos tipos de trastornos cardíacos.

Se supuso que las propiedades eléctricas más sutiles de los impulsos nerviosos eran iniciadas y propagadas por modificaciones químicas en el nervio. Esto pasó de ser una simple hipótesis a ser un hecho perfectamente establecido gracias a la labor experimental del fisiólogo alemán Emil Du Bois-Reymond, en el siglo XIX; mediante un delicado galvanómetro fue capaz de detectar pequeñas corrientes eléctricas en los nervios estimulados.

Con los instrumentos electrónicos modernos se ha conseguido alcanzar un increíble grado de sensibilidad y exactitud en las investigaciones de las propiedades eléctricas del nervio. Mediante la colocación de delgados electrodos en diferentes puntos de una fibra nerviosa y detectando las modificaciones eléctricas mediante un osciloscopio, es posible medir la intensidad de un impulso nervioso, su duración, velocidad de propagación, etc. Gracias a la labor realizada en este campo, los fisiólogos americanos, Joseph Erlanger y Herbert Spencer Gasser, compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1944.

Si se aplican pequeños impulsos eléctricos de intensidad creciente a una particular célula nerviosa, hasta una cierta intensidad ésta no responderá. Luego, bruscamente, la célula emitirá un impulso, que correrá a lo largo de la fibra. Por tanto, la célula tiene un umbral; o no reacciona a un estímulo subliminal o bien reacciona a un estímulo liminal, emitiendo un impulso de una cierta intensidad fija. La respuesta, en otras palabras, es del tipo del «todo o nada». Y la naturaleza del impulso desencadenado por el estímulo parece ser la misma en todos los nervios.

¿Cómo puede un proceso tan simple como es del todo o nada, de sí o no, idéntico en cualquier lugar, dar origen a sensaciones ópticas complejas, por ejemplo, o a las complejas respuestas digitales cuando se toca un violín? Parece que un nervio, tal como el óptico, contiene un gran número de fibras individuales, algunas de las cuales pueden emitir impulsos y otras no, y en ellas la emisión de impulsos puede tener lugar en rápida sucesión o lentamente, dando lugar a un tipo de respuesta, posiblemente complejo, que se ajusta continuamente a los cambios en el estímulo. (Por su labor en este campo, el fisiólogo inglés Edgar Douglas Adrian compartió, con Sherrington, el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1932.) Ese tipo de respuesta variable puede ser continuamente «rastreado» por el cerebro y ser interpretado de forma apropiada, pero no se conoce nada acerca de cómo se realiza la interpretación o cómo el tipo de respuesta es traducido en una actividad tal como la contracción de un músculo o la secreción de una glándula.

La emisión de impulsos por la fibra nerviosa aparentemente depende del movimiento de iones a través de la membrana de la célula. Corrientemente, el interior de la célula tiene un exceso relativo de iones potasio, mientras que en el exterior de la célula hay un exceso de iones sodio. De algún modo la célula conserva los iones potasio en su interior y, en cambio, elimina los iones sodio hacia el exterior, de tal manera que las concentraciones a ambos lados de la membrana celular no son iguales. Actualmente se considera que existe una «bomba de sodio» de algún tipo en el interior de la célula, la cual expulsa los iones sodio hacia el exterior tan rápidamente como penetran. En cualquier caso, existe una diferencia de potencial eléctrico de cerca de una décima de voltio a través de la membrana celular, estando el interior negativamente cargado con respecto al exterior. Cuando se estimula la célula nerviosa, la diferencia de potencial a través de la

membrana desaparece, y esto representa la emisión de un impulso por la célula. Se requieren algunas milésimas de segundo para que vuelva a restituirse la diferencia de potencial, y durante este intervalo el nervio no reaccionará a otro estimulo: este intervalo de tiempo se denomina «período refractario».

Una vez la célula ha emitido un impulso, éste corre a lo largo de la fibra por una serie de emisiones de impulsos, excitando cada sucesivo segmento de la fibra al siguiente. El impulso sólo puede correr a lo largo del axón, debido a que el segmento que acaba de emitir un impulso no puede volver a emitir otro hasta haber transcurrido un período de reposo.

Las investigaciones que relacionaron en la forma descrita la acción nerviosa con la permeabilidad iónica determinaron que se concediera el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1963 a dos fisiólogos británicos, Aland Lloyd Hodkin y Andrew Fielding Huxley, y a un fisiólogo australiano, John Carew Eccles.

¿Qué ocurre cuando, por ejemplo, el impulso que corre a lo largo de la fibra nerviosa llega a una sinapsis? —la hendidura existente entre una célula nerviosa y la siguiente—. Aparentemente, el impulso nervioso determina la producción de una sustancia química que puede atravesar la hendidura sináptica e iniciar un impulso nervioso en la siguiente célula nerviosa. De esta manera, el impulso puede ser transmitido de una célula a otra.

Una de las sustancias químicas que indudablemente influye sobre los nervios es la hormona adrenalina. Actúa sobre los nervios del sistema simpático que reduce la actividad del sistema digestivo y acelera la frecuencia respiratoria y la cardíaca. Cuando la angustia o el peligro estimulan las glándulas suprarrenales, que así segregan más hormona, la estimulación de los nervios simpáticos determina que se movilice más sangre en el organismo, llevando más oxígeno a los tejidos y reduciendo, en cambio, la digestión en ese periodo, a consecuencia de cuyo fenómeno se ahorra energía durante el estado de emergencia.

Los fisiólogos americanos John A. Larsen y Leonard Keeler utilizaron este hallazgo para idear una máquina que registrara las modificaciones de la presión sanguínea, la frecuencia del pulso, la frecuencia respiratoria y la perspiración ocasionadas por la emoción. Este aparato, el «polígrafo», registra el esfuerzo emocional realizado al decir una mentira: la cual siempre implica el peligro de su descubrimiento en cualquier individuo normal o razonablemente normal y, por tanto, provoca la liberación de adrenalina. Si bien no es infalible, el polígrafo ha conseguido gran fama como «detector de mentiras». En el proceso normal, las terminaciones nerviosas del sistema nervioso simpático segregan un compuesto similar a la adrenalina, llamado «noradrenalina». Esta sustancia química sirve para transmitir impulsos nerviosos a través de la sinapsis, propagando el mensaje por estimulación de las terminaciones nerviosas en el otro lado de la hendidura sináptica.

A principios de la década de 1920, el fisiólogo inglés Henry Daley el fisiólogo alemán Otto Loewi (que compartieron el premio Nobel de Medicina y Fisiología de 1936) estudiaron una sustancia química que realizaba esta función en la mayor parte de los nervios que no pertenecían al sistema simpático. Esta sustancia se denomina acetilcolina. Ahora se cree que se halla implicada no sólo en la conducción del impulso en la sinapsis, sino también en su transmisión por la propia fibra nerviosa. Quizá la acetilcolina actúe sobre la «bomba de sodio». De cualquier forma, la sustancia parece que se forma momentáneamente en la fibra nerviosa y es destruida con rapidez por una enzima llamada «colinesterasa». Cualquier agente que inhiba la acción de la colinesterasa interferirá este ciclo químico e interrumpirá la transmisión de los impulsos nerviosos. Sustancias letales como los «gases nerviosos» inhiben la colinesterasa. Al bloquear la conducción de los impulsos nerviosos, pueden interrumpir los latidos cardíacos y producir la muerte en pocos minutos. La aplicación de estas sustancias a la larga es evidente. Pueden usarse, de forma menos inmoral, como insecticidas.

Una interferencia menos drástica de la colinesterasa es la producida por los anestésicos locales, que de esta manera pueden suspender (temporalmente) los impulsos nerviosos asociados con el dolor.

Gracias a las corrientes eléctricas implicadas en la conducción de los impulsos nerviosos, es posible «leer» la actividad del cerebro de una manera que, sin embargo, no ha permitido aún traducir por completo lo que nos dicen las ondas cerebrales. En 1929, un psiquiatra alemán, Hans Berger, comunicó sus primeros trabajos, en los que aplicaba electrodos sobre diversas partes de la cabeza y era capaz de descubrir ondas rítmicas de actividad eléctrica.
Berger dio al ritmo más pronunciado el nombre de «onda alfa». En la onda alfa, el potencial varía alrededor de 20 microvoltios en un ciclo de aproximadamente diez veces por segundo. La onda alfa es la más evidente y se pone más claramente de manifiesto cuando la persona se halla en reposo con los ojos cerrados. Cuando los ojos están abiertos, pero sin ver un objeto iluminado con una forma determinada, persiste la onda alfa. Sin embargo, cuando el individuo ve el medio ambiente con su multiplicidad de formas, desaparece la onda alfa o bien es enmascarada por otros ritmos más prominentes. Después de un cierto intervalo, si no aparece nada nuevo en el campo visual, vuelve a aparecer la onda alfa. Los nombres característicos de los otros tipos de ondas son «ondas beta», «ondas delta» y «ondas theta».
Los electroencefalogramas («registros eléctricos de la actividad cerebral», más conocidos con las siglas «EEG») han sido ampliamente estudiados y revelan que cada individuo posee su propio tipo de comportamiento electroencefalográfico, que varía con la excitación y el sueño. Aunque el electroencefalograma aún está lejos de ser un método adecuado para «leer los pensamientos» o reflejar la actividad intelectual de forma precisa, ayuda a diagnosticar importantes trastornos de la función cerebral, particularmente la epilepsia. También puede utilizarse para localizar zonas de lesión cerebral o tumores cerebrales.
En la década de 1960, para la interpretación de los EEG se utilizaron computadoras especialmente ideadas. Si se provoca un cambio ambiental particularmente pequeño en un individuo, es de suponer que se producirá alguna respuesta en el cerebro, la cual se reflejará por una pequeña alteración del tipo de electroencefalograma en el momento en que sea introducida la modificación. Sin embargo, el cerebro se halla ocupado en otras muchas actividades y la pequeña alteración en el EEG no se pondrá de manifiesto. No obstante, si se repite el proceso una y otra vez, la computadora puede ser programada de tal modo que halle el valor medio del tipo de EEG y registre la diferencia que aparece de forma reiterada.
Hacia 1964, el fisiólogo americano Manfred Clynes comunicó análisis lo suficientemente minuciosos como para indicar, mediante el estudio de sólo los electroencefalogramas, el color que había estado mirando el individuo estudiado. El neurofisiólogo inglés W. Grey Walter comunicó de forma similar un tipo de señales cerebrales que parecían características del proceso de aprendizaje. Aparecen cuando la persona estudiada tiene razones para suponer que se halla ante un estímulo que le incita a pensar o actuar. Walter las denominó «ondas de expectación». El fenómeno inverso, es decir, el de provocar actividades específicas mediante la estimulación eléctrica directa del cerebro, también fue comunicada en 1965. José M. Rodríguez Delgado, de Yale, transmitiendo una estimulación eléctrica mediante señales de radio, hizo que los animales caminaran, treparan, bostezaran, durmieran, se aparearan, interrumpió el desarrollo de emociones, etc., y todo ello por control a distancia. Resultó muy espectacular el que lograra que un toro, en plena embestida, se detuviera y se alejara pacíficamente al trote.

Comportamiento Humano

A diferencia de los fenómenos físicos, tales como los movimientos de los planetas o el comportamiento de la luz, la respuesta a los estímulos de los seres vivos nunca ha sido reducida a leyes naturales rigurosas y quizá nunca lo sea. Hay muchos autores que insisten en que el estudio de la conducta del ser humano no puede llegar a ser una verdadera ciencia, en el sentido de ser capaz de explicar o predecir el comportamiento en una situación dada, basándose en leves naturales universales. No obstante, la vida no es una excepción de la ley natural, y puede argüirse que el

comportamiento de los seres vivos se explicaría totalmente si se conocieran todos los factores operantes. La cuestión crucial radica en esta última frase. Es improbable que algún día se conozcan todos los factores; hay demasiados y son excesivamente complejos. Sin embargo, el hombre no precisa renunciar a la comprensión de sí mismo. Existe un amplio espacio para un mejor conocimiento de sus propias complejidades mentales, y aún cuando nunca podamos llegar al final de la senda, tenemos la esperanza de correr un largo trecho por ella.

No sólo es este tema particularmente complejo, sino que su estudio no ha experimentado grandes progresos durante mucho tiempo. La Física alcanzó la madurez en 1600, y la Química, en 1775, pero el estudio mucho más complejo de la «Psicología experimental» data sólo de 1879, cuando el fisiólogo alemán Wilhelm Wundt creó el primer laboratorio dedicado al estudio científico del comportamiento humano. El propio Wundt se interesó, sobre todo, por las sensaciones y la forma como el ser humano percibía los detalles del universo a su alrededor.

Casi al mismo tiempo se inició el estudio del comportamiento humano en una aplicación particular: la del ser humano como ente trabajador. En 1881, el ingeniero americano Frederick Winslow Taylor comenzó a medir el tiempo requerido para realizar ciertas tareas y elaboró métodos para organizar de tal forma el trabajo que se redujera al mínimo el tiempo necesario para efectuarlo.

Fue el primer «experto en eficiencia» y, al igual que todos los expertos en eficiencia, que tienden a perder la noción de los valores ocultándose tras el cronómetro, resultó poco popular entre los trabajadores.

Pero cuando estudiamos el comportamiento humano, paso a paso, bien en las condiciones de control del laboratorio o de forma empírica en una fábrica, parece que estamos hurgando en una delicada máquina con toscas herramientas.

En los organismos sencillos podemos ver directamente respuestas automáticas de la clase llamada «tropismos» (derivado de una palabra griega que significa «dirigirse a»). Las plantas muestran «fototropismo» (se dirigen hacia la luz), «hidrotropismo» (se dirigen hacia el agua: en este caso, las raíces), y «quimiotropismo» (se dirigen hacia sustancias químicas particulares). El quimiotropismo también es característico de muchos animales, desde los protozoos a las hormigas. Como se sabe, ciertas mariposas se dirigen volando hacia un olor distante incluso tres kilómetros. Que los tropismos son completamente automáticos se demuestra por el hecho que una mariposa con fototropismo volará incluso hacia la llama de una vela.

Los reflejos mencionados anteriormente no parecen progresar mucho más allá de los tropismos, y la impresión, también citada, representa el aprendizaje, pero de una forma tan mecánica que apenas si merece ese nombre. Así pues, ni los reflejos ni la impresión pueden ser considerados característicos sólo de los animales inferiores: el hombre también los manifiesta.

El niño, desde que nace, flexionará un dedo con fuerza si se le toca la palma de la mano, y succionará un pezón si se le coloca entre sus labios. Resulta evidente la importancia de tales instintos, para garantizar que el niño no se caiga ni se desnutra.

También parece inevitable que el niño esté sujeto a la impresión. No es un sujeto adecuado para la experimentación, por supuesto, pero pueden obtenerse conocimientos mediante observaciones accidentales. Los niños que a la edad de empezar a articular sonidos no se hallen expuestos a los del lenguaje real, no pueden desarrollar más tarde la capacidad de hablar, o si lo hacen es en un grado anormalmente limitado. Los niños que viven en instituciones impersonales, donde son bien alimentados y donde tienen ampliamente cubiertas sus necesidades físicas, pero donde no gozan del cariño y cuidados maternos, se convierten en pequeños seres entristecidos. Su desarrollo mental y físico se halla considerablemente retrasado y muchos mueren al parecer sólo por la falta del «calor maternal», por lo que puede suponerse que les faltan estímulos adecuados para determinar la impresión de modos de comportamiento necesarios. De forma similar, los niños que son desprovistos indebidamente de los estímulos que implica la compañía de otros niños durante ciertos períodos críticos de la

niñez, desarrollan personalidades que pueden estar seriamente distorsionadas de una forma u otra.
Por supuesto, puede objetarse que los reflejos y la impresión desempeñan sólo en la infancia un papel importante. Cuando un ser humano alcanza la edad adulta, es entonces un ser racional que responde de una forma algo más que mecánica. Pero, ¿lo es? Dicho de otra manera, ¿posee el hombre libre albedrío? es decir, ¿piensa lo que quiere?, o bien su comportamiento, en algunos aspectos, se halla determinado de forma absoluta por el estímulo, como lo estaba el toro de la experiencia de Delgado descrita en la página 170.
Puede afirmarse, tomando como base la teología o la fisiología, la existencia de libre albedrío, pero no conozco a nadie que haya encontrado una forma de demostrarlo experimentalmente. Demostrar el «determinismo», es decir, lo contrario del libre albedrío, tampoco es fácil. Sin embargo, se han hecho intentos en esa dirección. Los más notables fueron los del fisiólogo ruso Iván Petrovich Pávlov.
Pávlov comenzó con un interés específico en el mecanismo de la digestión. Mostró hacia la década de 1880 que el jugo gástrico era segregado en el estómago tan pronto como se colocaba alimento en la lengua del perro; el estómago segregaba este jugo, aunque el alimento no llegara hasta él. Pero si se seccionaba el nervio vago (que corre desde el bulbo raquídeo hasta diversas partes del tubo digestivo) cerca del estómago, cesaba la secreción. Por su labor en fisiología de la digestión, Pávlov recibió el premio Nobel de Fisiología y Medicina de 1904.
Pero, al igual que otros Premios Nobel (principalmente, Ehrlich y Einstein), Pávlov realizó otros descubrimientos tan notorios como aquellos por los que había realmente recibido el premio.
Decidió investigar la naturaleza automática o refleja de las secreciones y eligió la secreción de la saliva como un ejemplo conveniente y fácil de observar. La visión o el color de la comida determinaba que un perro (y un ser humano, que para el caso es lo mismo) comenzara a segregar saliva. Lo que Pávlov hizo fue tocar una campana, que sonaba cada vez que colocaba alimentos delante de un perro. Eventualmente, después de veinte a cuarenta asociaciones de este tipo, el perro comenzaba a segregar saliva en cuanto oía las campanadas, aún cuando no estuviera presente alimento alguno. Por tanto, se había creado una asociación. El impulso nervioso que transmitía el sonido de la campana hasta el cerebro se había hecho equivalente al que representaba la vista o el color del alimento.
En 1903, Pávlov inventó el término «reflejo condicionado» para este fenómeno: la salivación era una «respuesta condicionada». Involuntariamente, el perro segregaba saliva al oír la campana, del mismo modo como la habría segregado al ver el alimento. Por supuesto, la respuesta condicionada podía ser suprimida, por ejemplo, negando al perro repetidamente la comida cuando sonaba la campana y sometiéndolo, en cambio, a un moderado shock eléctrico. Eventualmente, el perro no segregaría saliva, pero en cambio se estremecería al sonar la campana, aunque no recibiera el shock eléctrico.
Además, Pávlov fue capaz, de obligar a los perros a tomar sutiles decisiones, asociando el alimento a un círculo luminoso y un shock eléctrico a una elipse luminosa.
El perro podría hacer la distinción, pero cuando la elipse se hacía cada vez más circular, la distinción resultaba difícil. A veces, el perro, en una agonía de indecisión, desarrollaba lo que sólo podía llamarse una «crisis nerviosa».
Las experiencias de condicionamiento se han convertido en un poderoso instrumento en psicología. A través de ellas, los animales algunas veces llegan casi a «hablar» con el experimentador. La técnica ha hecho posible investigar las capacidades de aprendizaje de diversos animales, sus instintos, su capacidad visual, su capacidad para diferenciar los colores, etc. De todas las investigaciones, no fueron menos llamativas las del naturalista austríaco Karl von Frisch. Von Frisch entrenó abejas para dirigirse a platos situados en un cierto lugar para tomar su alimento, y observó que estos buscadores de alimentos pronto señalaban a otras abejas en su colmena donde se hallaba localizado el alimento. A partir de sus experiencias, Von Frisch

dedujo que las abejas podían distinguir ciertos colores, incluso el ultravioleta, pero no el rojo, y que se comunicaban con otras mediante una danza sobre las colmenas, que la naturaleza y el vigor de la danza indicaban la dirección y distancia del plato con el alimento a la colmena, e incluso lo abundante o escasa que era la cantidad del alimento, y que las abejas eran, capaces de conocer la dirección por la polarización de la luz en el cielo. Los fascinantes descubrimientos de Von Frisch acerca del lenguaje de las abejas abrió todo un nuevo campo al estudio del comportamiento animal.

En teoría, puede considerarse que todo aprendizaje consiste de respuestas condicionadas. Al aprender a escribir a máquina, por ejemplo, se empieza por observar las teclas y gradualmente a sustituir por ciertos movimientos automáticos de los dedos la selección visual de la tecla apropiada. Así, el pensamiento «K» se acompaña de un movimiento específico del dedo medio de la mano derecha; el pensamiento «el» causa que el segundo dedo de la mano izquierda y el primer dedo de la mano derecha golpeen las teclas en ese orden.[15] Estas respuestas no implican la realización de un pensamiento consciente. A veces, un mecanógrafo con práctica debe detenerse y pensar dónde se encuentran las letras. Personalmente soy un mecanógrafo rápido y completamente mecánico, y si se me pregunta, por ejemplo, dónde se halla situada la letra «f» sobre el teclado, lo único que puedo contestar (después de mirar brevemente el teclado) es moviendo mis dedos en el aire, como si picara en la máquina e intentar captar uno de estos movimientos en el momento de marcar la «f». Sólo mis dedos conocen el teclado; mi mente consciente no.

El mismo principio puede aplicarse a un aprendizaje más complejo, tal como leer o tocar el violín. ¿Por qué, después de todo, el diseño **CARBÓN**, en negritas sobre este papel, evoca automáticamente la imagen de una barra de acero teñida y un cierto sonido que representa una palabra? Usted no precisa decir las letras o buscar en su memoria o razonar acerca del posible mensaje contenido en el diseño; por un condicionamiento repetido, asocia automáticamente el símbolo con la misma cosa.

En las primeras décadas de este siglo, el psicólogo americano John Broadus Watson construyó toda una teoría del comportamiento humano, llamada «behaviorismo», basada en el condicionamiento. Watson incluso llegó a sugerir que la gente no tenía un control deliberado sobre la forma como se comportaba; ésta se hallaba determinada por condicionamientos. Aunque esta teoría fue popular en aquella época, nunca tuvo gran aceptación entre los psicólogos. En primer lugar, aún cuando la teoría fuera básicamente correcta —si el comportamiento sólo es guiado por el condicionamiento— el «behaviorismo» no vierte mucha luz sobre aquellos aspectos del comportamiento humano que tienen el máximo interés para nosotros, tales como la inteligencia creadora, la capacidad artística y el sentido de lo correcto y lo incorrecto. Sería imposible identificar todas las influencias condicionantes y relacionarlas a un modelo de pensamientos y creencias de cualquier forma mensurable; y algo que no puede ser medido no puede ser sujeto de un estudio realmente científico.

En segundo lugar, ¿qué es lo que tiene que ver el condicionamiento con un proceso tal como la intuición? La mente, bruscamente, asocia dos pensamientos o sucesos previamente no relacionados, en apariencia por azar, y crea una idea o respuesta enteramente nueva.

Los gatos y los perros, al resolver tareas (por ejemplo, hallar cómo deben accionar una palanca con objeto de abrir una puerta), pueden hacerlo por un proceso de ensayo y error. Pueden moverse casi al azar y frenéticamente hasta que alguno de sus movimientos acciona la palanca. Si se les permite repetir la tarea, una vaga memoria del movimiento adecuado puede inducirles a hacerlo con mayor rapidez, y luego aún más tempranamente en el siguiente intento, hasta que por último mueven en el primer intento la

[15] O hay un error de traducción o hay un error de Asimov, muy poco probable teniendo en cuenta cómo escribía, pero la afirmación de cómo escribir “el” no es correcta, ni siquiera en inglés (N. de Xixoxux)

palanca. El animal más inteligente es el que realiza menos intentos para, a partir de los movimientos según el proceso de ensayo-error, llegar a una acción útil con un cierto propósito.

Cuando llegamos al ser humano, la memoria ya no es escasa. La tendencia suele ser buscar una moneda de diez céntimos, que se ha caído, dirigiendo ojeadas al azar hacia el suelo, pero por experiencias pasadas puede mirar en lugares en los que ha hallado la moneda en ocasiones precedentes, o bien mirar en la dirección del sonido que ha producido al caer, o bien efectuar, una búsqueda sistemática por el suelo. De forma similar, si se hallara en un lugar cerrado, podría intentar escaparse golpeando o dando puntapiés en las paredes, al azar, pero también podría saber el aspecto que tendría una puerta y concentrar sus esfuerzos sobre lo que se pareciera a ella. En resumen, un hombre puede simplificar el proceso de ensayo y error al recordar la experiencia acumulada en años precedentes, y transferirla del pensamiento a la acción. Al buscar una solución, puede no hacer nada más que simplemente pensar. Este ensayo y error espiritual es lo que nosotros llamamos razón, y que no se halla simplemente restringida a la especie humana.

Los monos, cuyos tipos de comportamiento son más simples y más mecánicos que los del ser humano, muestran algunos indicios espontáneos de lo que puede llamarse razón. El psicólogo alemán Wolfgang Köhler, encontrándose en una de las colonias de África, al iniciarse la Primera Guerra Mundial, descubrió algunos sorprendentes ejemplos de esto en sus famosos experimentos con chimpancés. En un caso, un chimpancé, después de intentar en vano alcanzar plátanos con un palo que era demasiado corto, tomó bruscamente otra caña de bambú que el experimentador había dejado allí, unió los dos palos entre sí y de este modo logró llegar hasta los frutos. En otro caso, un chimpancé amontonó una caja sobre otra hasta alcanzar los plátanos que pendían sobre él. Estos actos no habían sido precedidos de un entrenamiento o experiencia que pudiera haber creado la asociación en el animal; aparentemente, eran fugaces destellos de inspiración.

Para Köhler, el aprendizaje implicaba la totalidad de un proceso, más que porciones individuales de él. Fue uno de los fundadores de la escuela psicológica de la *Gestatl* (que es la palabra alemana «modelo»).

A decir verdad, el poder del condicionamiento ha resultado ser bastante más amplio de lo que se había supuesto. Durante largo tiempo se creyó que ciertas funciones corporales, tales como las pulsaciones cardíacas, la presión sanguínea, las contracciones intestinales, se hallaban fundamentalmente bajo la supervisión del sistema nervioso autónomo y, por tanto, eran ajenas al control consciente. Desde luego, hay ciertos ardides. Por ejemplo, un adepto del yoga puede producir ciertos efectos en sus latidos cardíacos mediante el control de los músculos pectorales, pero eso es tan significativo como detener la hemorragia de una arteria en la muñeca ejerciendo presión con el pulgar. Por otra parte, podemos acelerar los latidos del corazón simulando un estado de ansiedad, pero eso es una manipulación consciente del sistema nervioso autónomo. ¿Es posible acelerar la marcha del corazón o elevar la presión sanguínea sin recurrir a las manipulaciones extremas de los músculos o el cerebro? El psicólogo americano Neal Elgar Miller y sus colaboradores han llevado a cabo experimentos de condicionamiento con ratas: recompensaban a los animales cuando éstos lograban elevar su presión sanguínea por una razón u otra, o acelerar y retardar los latidos de su corazón. Con el tiempo, y estimuladas por el codiciable premio, las pequeñas bestias aprendieron a ejecutar espontáneamente los cambios efectuados por el sistema nervioso autónomo —tal como hubieran aprendido a apretar una palanca con idéntica finalidad—.

Por lo menos uno de los diversos programas experimentales en los que se empleaban voluntarios humanos (varones) a quienes se recompensaba con rápidas proyecciones luminosas de fotografías de muchachas desnudas, demostraron la capacidad de los voluntarios para suscitar una elevación o un descenso de la presión sanguínea como respuesta, los voluntarios no sabían lo que se esperaba de ellos para provocar las proyecciones —y las imágenes

desnudas—, pero tras unas cuantas pruebas percibieron que con esa actitud podían contemplar más a menudo el grato espectáculo. Asimismo los controles corporales autónomos tienen más sutileza de lo que se había supuesto en un principio. Puesto que los organismos naturales están sujetos a los ritmos naturales —el flujo y reflujo de las mareas, la alternancia algo más lenta del día y la noche, la oscilación todavía más pausada de las estaciones—, no es sorprendente que ellos mismos reaccionen también rítmicamente. Los árboles se desprenden de sus hojas en otoño y echan brotes en primavera; los seres humanos tienen sueño por la noche y se despabilan al amanecer.

Lo que no se percibió claramente hasta fechas muy recientes fue la complejidad y multiplicidad de las respuestas rítmicas, así como su naturaleza automática, que persiste incluso en ausencia del ritmo ambiental.

Así, por ejemplo, las hojas de los vegetales se yerguen y abaten en un ritmo diurno coincidiendo con la salida y la puesta del sol. Esto lo reveló la fotografía a altas velocidades. Los arbustos creciendo en la oscuridad no mostraron ese ciclo, pero la potencialidad estaba allí, y una exposición a la luz —una tan sólo— fue suficiente para transformar la potencialidad en realidad. Entonces se inició el ritmo, e incluso prosiguió cuando se suprimió otra vez la luz. El período exacto del ritmo varió de una planta a otra —desde las 24 a las 26 horas con ausencia de luz—, pero siempre rondando las 24 horas bajo los efectos reguladores del sol. Se verificó un ciclo de 20 horas utilizando la luz artificial alternativamente —10 horas encendida, 10 apagada—, pero tan pronto como se dejó encendida la luz se restableció el ritmo aproximado de 24 horas.

Ese ritmo diario, especie de «reloj biológico» que funciona incluso sin los estímulos externos, afecta a la vida entera. Franz Halberg, de la Universidad de Minnesota, lo denominó «ritmo circasiano» del latín «circa dies» que significa «alrededor de un día».

Los seres humanos no son inmunes a esos ritmos. Diversos hombres y mujeres se ofrecieron voluntariamente para vivir durante meses en cavernas, sin mecanismos de relojería e ignorando cuándo era de día o de noche. Pronto perdieron toda idea del tiempo, comieron y durmieron de forma errática. Ahora bien, tomaron buena nota de su temperatura, pulso, presión sanguínea, ondas cerebrales y enviaron esos datos junto con otras medidas a la superficie, donde los observadores los analizaron en función del tiempo. Resultó que, si bien los cavernícolas mostraron desorientación con respecto al tiempo, su ritmo corporal no la mostró. El ritmo mantuvo obstinadamente un período aproximado de veinticuatro horas, con todas las medidas elevándose y descendiendo regularmente pese a la larga estancia en la cueva.

Esto no es tan sólo, ni mucho menos, una cuestión abstracta. En la Naturaleza, la rotación terrestre se mantiene inmutable, la alternancia entre día y noche permanece constante, está al abrigo de cualquier interferencia humana, pero únicamente si uno permanece en el mismo lugar de la Tierra o se traslada de Norte a Sur. Ahora bien, si recorremos rápidamente grandes distancias de Este a Oeste, cambiamos la hora del día. Podemos aterrizar en Japón para el almuerzo (horario japonés), cuando nuestro reloj biológico está anunciando que es hora de irse a la cama. En la Era del reactor, el viajero encuentra creciente dificultades para compaginar su actividad con la de gentes que le rodean y hacen su vida normal. Si lo hace cuando su esquema de secreción hormonal, por ejemplo, no coincida con el esquema de su actividad , se sentirá cansado y debilitado, padecerá «fatiga de reactor».

En tonos menos dramáticos, la capacidad de un organismo para soportar una dosis de rayos X o diversos medicamentos depende, a menudo, de la disposición del reloj biológico. Puede ocurrir que el tratamiento médico deba variar con las horas del día, o bien circunscribirse a una hora determinada para alcanzar un efecto óptimo y reducir a un mínimo los efectos secundarios. ¿A qué se deberá esa admirable regularidad del reloj biológico? Se sospecha que su regulador sea la glándula pineal. En algunos reptiles, la glándula pineal está particularmente desarrollada y parece similar, por su estructura, al ojo. La tuátara, un reptil parecido al lagarto,

una especie superviviente de su orden y existente tan sólo en algunas islas pequeñas de Nueva Zelanda, tiene un singular «ojo pineal»: es un abultamiento en el centro del cráneo, cubierto de piel, particularmente prominente seis meses después del nacimiento y sensible a la luz sin duda alguna.

La glándula pineal no tiene «visión» en el sentido usual de la palabra, pero produce una sustancia química que asciende y desciende respondiendo rítmicamente a la aparición y desaparición de la luz. Es posible, pues, que regule el reloj biológico e incluso lo haga cuando se interrumpa la periodicidad de la luz (habiendo aprendido su lección química mediante una especie de condicionamiento).

Pero preguntémonos ahora cómo trabaja la glándula pineal en los mamíferos, pues aquí no se halla bajo la piel en el centro del cráneo, sino enterrada profundamente debajo del cerebro y ocupando su centro. ¿Existirá algo más penetrante que la luz, algo cuyo ritmo tenga el mismo sentido? Hay quienes especulan sobre los rayos cósmicos pensando encontrar ahí la respuesta. Estos rayos tienen un ritmo circadiano propio, gracias al campo magnético terrestre y al viento solar, y quizás esa fuerza sea un regulador externo. Pero, aunque se encontrara el regulador externo, ¿acaso es identificable el reloj biológico interno? ¿No habrá alguna reacción química en el cuerpo que se eleve y descienda a un ritmo circadiano y controle todos los ritmos restantes? ¿No hay ninguna reacción rectora a la que podamos etiquetar como *el* reloj biológico? De ser así, no se ha logrado encontrarla todavía.

Por simple razonamiento, a partir del reflejo condicionado resulta difícil comprender las sutilezas de la intuición y de la razón. Se ha iniciado el estudio del comportamiento humano con métodos que son sumamente intuitivos. Estos métodos se remontan casi dos siglos atrás, hasta un médico austríaco, Franz Anton Mesmer, que se convirtió en la sensación de Europa debido a sus experiencias con un poderoso instrumento para estudiar el comportamiento humano. Utilizó primero imanes y luego sólo sus manos, obteniendo sus efectos mediante lo que él llamó «magnetismo animal» (luego rebautizado con el nombre de «mesmerismo»); colocaba un paciente en trance y señalaba que el paciente estaba curado de su enfermedad. Pudo muy bien haber curado a algunos de sus pacientes (ya que es posible tratar algunos trastornos por sugestión), y como consecuencia de esto fueron muy numerosos sus ardientes seguidores, inclusive el marqués de Lafayette, poco después de su triunfo en Norteamérica. Sin embargo, Mesmer, un ardiente astrólogo y místico, fue investigado con escepticismo, pero con imparcialidad, por un comité, formado, entre otros, por Lavoisier y Benjamin Franklin, y denunciado como farsante, cayendo pronto en desgracia.

No obstante, había iniciado algo nuevo. En 1850, un cirujano británico llamado James Braid dio nuevo auge al hipnotismo (fue el primero en usar este término) como procedimiento útil en medicina, y otros médicos también lo adoptaron. Entre ellos se encontraba un doctor vienés llamado Josef Breuer, quien, hacia 1880, empezó a usar la hipnosis específicamente para tratar los trastornos nerviosos y emocionales.

Por supuesto, el hipnotismo (del griego *hypnos* = sueño) se conocía desde los tiempos antiguos, y había sido usado a menudo por los místicos. Pero Breuer y otros empezaron ahora a interpretar sus efectos como prueba de la existencia de un nivel «inconsciente» de la mente.

Motivaciones de las que el individuo era inconsciente, se hallaban enterradas ahí, y podrían ser puestas al descubierto mediante la hipnosis. Era tentador suponer que estas motivaciones eran suprimidas por la mente consciente, debido a que se hallaban asociadas a los sentimientos de vergüenza o de culpabilidad, y que podían explicar un comportamiento sin finalidad alguna, irracional o incluso vicioso.

Breuer empleó el hipnotismo para demostrar las causas ocultas de la histeria y otros trastornos del comportamiento. Trabajaba con él un discípulo llamado Sigmund Freud. Durante varios años trataron a pacientes, sometiéndolos a una ligera hipnosis y alentándoles a hablar. Hallaron que los pacientes exponían experiencias o impulsos ocultos en el inconsciente, lo cual a menudo actuaba

como un catártico, haciendo desaparecer sus síntomas después de despertarse de la hipnosis.
Freud llegó a la conclusión de que prácticamente la totalidad de los recuerdos y motivaciones reprimidas eran de origen sexual. Los impulsos sexuales, convertidos en tabú por la sociedad y los padres del niño, eran profundamente sumergidos en el inconsciente, pero aún así intentaban hallar expresión y generaban intensos conflictos que eran sumamente perjudiciales por no ser reconocidos y admitidos.
En 1894, después de romper con Breuer debido a que éste no estaba de acuerdo con su interpretación de que el factor sexual era la casi exclusiva causa desencadenante, Freud siguió solo su tarea, exponiendo sus ideas acerca de las causas y tratamiento de los trastornos mentales. Abandonó el hipnotismo y solicitaba de sus pacientes que hablaran de una forma casi al azar, es decir, diciendo aquello que surgiera en sus mentes. Cuando el paciente apreciaba que el médico prestaba una atención positiva a todo lo que decía, sin ninguna censura de tipo moral, lentamente —algunas veces muy lentamente—, el individuo empezaba a descubrir, a recordar cosas reprimidas desde hacía tiempo y olvidadas. Freud denominó «psicoanálisis» a este lento análisis de la «psique» (alma o mente en griego).
La dedicación de Freud al simbolismo sexual de los sueños y su descripción de los deseos infantiles para sustituir al progenitor del mismo sexo en el lecho marital («complejo de Edipo», en el caso de los muchachos, y «complejo de Electra», en las muchachas —denominados así en recuerdo a personajes de la mitología griega—) horrorizó a algunos y fascinó a otros. En la década de 1920, después de los estragos de la Primera Guerra Mundial y entre los ulteriores estragos de la prohibición en América y los cambios en las costumbres en muchas partes del mundo, los puntos de vista de Freud fueron bien acogidos y el psicoanálisis alcanzó la categoría de casi una moda popular. Sin embargo, más de medio siglo después de su descubrimiento, el psicoanálisis sigue siendo más un arte que una ciencia. Experiencias rigurosamente controladas, tales como las realizadas en Física y en otras ciencias «rigurosas», son, por supuesto, extraordinariamente difíciles de efectuar en Psiquiatría. Los médicos prácticos deben basar sus conclusiones, sobre todo, en la intuición y el juicio subjetivo. La Psiquiatría (de la que el psicoanálisis sólo es una de las técnicas) ha ayudado indudablemente a muchos pacientes, pero no ha obtenido curas espectaculares ni ha reducido notablemente la incidencia de la enfermedad mental. Tampoco se ha desarrollado una teoría que abarque todos los distintos aspectos de ésta y sea aceptada de forma general, comparable a la teoría de los microorganismos en las enfermedades infecciosas. En realidad, existen casi tantas escuelas de Psiquiatría como psiquiatras.
La enfermedad mental grave adopta varias formas, que se extienden desde la depresión crónica a una total separación de la realidad, en un mundo en el que algunos, al menos, de los detalles no corresponden a la forma como la mayoría de las personas ven las cosas. Esta forma de psicosis se denomina en general «esquizofrenia», término introducido por el psiquiatra suizo Eugen Bleuler. Esta palabra abarca tal multitud de trastornos, que no puede ser descrita como una enfermedad específica. Cerca del 60 % de todos los pacientes crónicos en nuestros frenocomios son diagnosticados como esquizofrénicos.
Hasta hace poco, únicamente podían ofrecerse tratamientos drásticos, como la lobotomía prefrontal o la terapéutica por shock eléctrico o insulínico (la última técnica fue introducida en 1933 por el psiquiatra austríaco Manfred Sakel). La Psiquiatría y el Psicoanálisis han representado una escasa aportación, salvo ocasionalmente estos primeros estadios, cuando el médico todavía es capaz de comunicarse con el paciente. Pero algunos recientes descubrimientos farmacológicos y de la química del cerebro («Neuroquímica») han proporcionado nuevas y alentadoras esperanzas.
Incluso antiguamente se sabía que ciertos jugos vegetales podían producir alucinaciones (ilusiones visuales, auditivas, etc.), y otros podían sumir a la persona en estados de felicidad. Las sacerdotisas de Delfos, en la antigua Grecia, masticaban alguna planta antes de pronunciar sus oráculos. Las tribus indias del sudoeste de Estados

Unidos crearon el ritual religioso de masticar peyote o mescal (que produce alucinaciones en color). Quizás el caso más dramático fue el de una secta musulmana en una plaza fuerte de las montañas del Irán, que utilizó el hachís, el jugo de las hojas de cáñamo, más familiarmente conocido por «marihuana». El fármaco, tomado en las ceremonias religiosas, daba a los consumidores la ilusión de conocer parte del paraíso al que sus almas irían después de morir, y obedecían cualquier mandato de su jefe, llamado el «Viejo de las Montañas», al objeto de recibir la llave del cielo. Sus órdenes eran matar a los enemigos de las reglas por él dictadas y a los oficiales hostiles del Gobierno musulmán: esto dio origen a la palabra «asesino», del árabe haxxaxin (el que usa haxix). Esta secta aterrorizó a la región hasta el siglo XII, en el que los invasores mongólicos, en 1226, se extendieron por las montañas y mataron hasta el último asesino.
El equivalente moderno de las hierbas euforizantes de los primeros tiempos (aparte del alcohol) es el grupo de fármacos conocidos como «tranquilizantes». Uno de los tranquilizantes se conoce en la India desde 1000 años a. de J.C., en forma de una planta llamada *Rauwolfia serpentina.* A partir de las raíces secas de esta planta, unos químicos americanos extrajeron, en 1952, la «reserpina», el primero de los tranquilizantes de uso popular. Varias sustancias con efectos similares poseen una estructura química más sencilla y han sido sintetizadas desde entonces.
Los tranquilizantes son sedantes, pero con una cierta diferencia. Reducen la ansiedad, sin deprimir apreciablemente otras actividades mentales. No obstante, tienden a crear somnolencia en las personas, y pueden ejercer otros efectos indeseables. Pero se halló que constituían una ayuda inapreciable para sedar y mejorar de su dolencia a los dementes, incluso a algunos esquizofrénicos. Los tranquilizantes no curan la demencia, pero suprimen ciertos síntomas que se oponen al tratamiento adecuado.
Al suprimir la hostilidad y la ira de los pacientes, y al calmar sus temores y ansiedades, reducen la necesidad de medidas drásticas encaminadas a restringir su libertad, facilitan que los psiquiatras establezcan contacto con los pacientes y aumentan las posibilidades de que el paciente abandone el hospital.
Pero los tranquilizantes alcanzaron una aceptación tan enorme entre el público, que aparentemente llegaron a considerarlos una panacea para olvidarse de todos sus problemas.
La reserpina resultó tener una gran semejanza con una importante sustancia del cerebro. Una porción de su compleja molécula es bastante similar a la sustancia llamada «serotonina». La serotonina fue descubierta en 1948, y desde entonces ha intrigado sumamente a los fisiólogos.
Se demostró su presencia en la región hipotalámica del cerebro humano y también diseminada en el cerebro y el tejido nervioso de otros animales, inclusive los invertebrados. Lo que es más importante, otras sustancias que afectan al sistema nervioso central presentan gran parecido con la serotina[16]. Una de ellas es un compuesto del veneno de los sapos llamado «bufotonina». Otra es la mescalina, la sustancia activa de los botones de mescal. La más dramática de todas es una sustancia llamada «dietilamida del ácido lisérgico» (conocida popularmente como LSD). En 1943, un químico suizo llamado Albert Hofmann llegó a absorber parte de este compuesto en el laboratorio y experimentó extrañas sensaciones. Desde luego, lo que él creyó percibir mediante sus órganos sensoriales no coincidió desde ningún concepto con lo que nosotros tenemos por la realidad objetiva del medio ambiente. É1 sufrió lo que llamamos alucinaciones, y el LSD es un ejemplo de lo que se denomina hoy día un «alucinógeno».
Quienes encuentran gratas las sensaciones experimentadas por influjo de un alucinógeno, lo describen como una «expansión mental», significando aparentemente que sienten —o creen sentir— el Universo más y mejor que en condiciones ordinarias. Pero eso mismo les ocurre también a los alcohólicos cuando consiguen alcanzar la fase del «delirium tremens». La

---

[16] La diferencia de nombres “serotonina” y “serotina” figura en el original en castellano. (N. de Xixoxux)

comparación no es tan desmesurada como pudiera parecer, pues ciertas investigaciones han demostrado que una pequeña dosis de LSD puede provocar en algunos casos ¡muchos síntomas de la esquizofrenia!

¿Qué puede significar todo esto? Bien, la serotonina (que es estructuralmente similar al aminoácido triptófano) puede ser escindida por una enzima llamada «amino-oxidasa», que existe en las células cerebrales. Supongamos que esta enzima es bloqueada por la acción de una sustancia competidora con una estructura similar a la serotonina —por ejemplo, el ácido lisérgico—. Cuando se elimine de este modo la enzima degradante, la serotonina se acumulará en las células cerebrales, y su concentración aumentará sumamente. Esto trastornará el equilibrio de serotonina en el cerebro y podrá determinar la aparición de un estado esquizofrénico.

¿Es posible que la esquizofrenia tenga su origen en un fenómeno de este tipo inducido de forma natural? La forma en que lo hereda la esquizofrenia ciertamente apunta a la existencia de algún trastorno metabólico (uno que, además, es controlado por genes). En 1962 se comprobó que, con cierto tratamiento, la orina de los esquizofrénicos contenía a menudo una sustancia ausente en la orina de los no esquizofrénicos. Tal sustancia resultó ser un compuesto químico denominado «dimetoxifeniletilamina», cuya estructura lo sitúa entre la adrenalina y la mescalina. Dicho de otra forma, ciertos esquizofrénicos parecen fabricar mediante algún error metabólico sus propios alucinógenos y entonces se hallan, en efecto, sometidos a intoxicación permanente.

Una dosis determinada de cualquier droga no hace reaccionar de idéntica forma a todo el mundo. Ahora bien, evidentemente es peligroso jugar con el mecanismo químico del cerebro. El convertirse en demente es un precio demasiado alto para la mayor o menor diversión que pueda proporcionar la «expansión mental». Pese a todo, la reacción de la sociedad contra el empleo de drogas —particularmente la marihuana, de la cual no se ha podido demostrar hasta ahora que sea tan dañina como otros alucinógenos— tiende a desorbitarse. Muchos de quienes condenan el uso de drogas son empedernidos consumidores de alcohol o tabaco, dos productos responsables de muchos males padecidos por el individuo y la sociedad. Este tipo de hipocresía tiende a minar la credibilidad del movimiento «antidroga».

La Neuroquímica nos da esperanzas de poder comprender algún día esa propiedad mental tan evasiva conocida por «memoria». Al parecer, hay dos variedades de memoria: de corto plazo y de largo plazo. Si buscamos un número telefónico, no nos será difícil recordarlo hasta la hora de marcar; luego lo olvidaremos automáticamente y, con toda probabilidad, no lo recordaremos jamás. Sin embargo, el número de teléfono que usamos frecuentemente no se desvanece, pertenece a la memoria de largo plazo. Incluso tras un lapso de varios meses, resurge con facilidad. Sin embargo, se pierde mucho de lo que conceptuamos como elementos pertenecientes a la memoria de largo plazo. Nosotros olvidamos innumerables cosas e incluso algunas de importancia vital (todo estudiante, en vísperas de exámenes, lo atestigua así, completamente abatido). Pero. ¿las olvidamos realmente? ¿Se han desvanecido de verdad, o están tan bien almacenadas que no sabemos dónde buscarlas, escondidas, por así decirlo, bajo muchos artículos triviales? La reproducción de estos recuerdos ocultos se ha convertido en una reproducción casi literal. El cirujano estadounidense Wilder G. Penfield, en la Universidad McGill, de Montreal, mientras operaba el cerebro de un paciente, tocó accidentalmente una zona particular, que motivó que el paciente oyera música. Esto ocurrió una y otra vez.

El paciente podía revivir la experiencia completamente, mientras permanecía del todo consciente acerca de los sucesos del presente. Al parecer, la estimulación apropiada puede hacer recordar con gran exactitud hechos pasados. El área implicada es la denominada «corteza interpretativa». Puede ser que la estimulación accidental de esta porción de la corteza dé lugar al fenómeno de *déjà vu* (la sensación de que ya ha ocurrido algo con anterioridad) y otras manifestaciones de «percepción extrasensorial».

Pero si la memoria es tan detallada. ¿cómo puede el cerebro hallar espacio para todo ello? Se estima que, durante la vida, el cerebro puede almacenar 1.000.000.000.000.000 (mil billones) de unidades de información. Para almacenar tan ingente cantidad, las unidades de almacenamiento deben ser de tamaño molecular. No habría espacio para nada mayor. .

Las sospechas se centran, en la actualidad, en el ácido ribonucleico (ARN) del que la célula nerviosa, sorprendentemente, es más rica que casi cualquier otro tipo de célula del organismo. Esto es sorprendente debido a que el ARN se halla implicado en la síntesis de las proteínas (véase capitulo XII) y, por ello, suele encontrarse en cantidades particularmente elevadas en aquellos tejidos que producen grandes cantidades de proteínas, bien porque están creciendo activamente o porque producen copiosas cantidades de secreciones ricas en proteínas. La célula nerviosa no puede inclinarse en ninguno de estos casos.

Un neurólogo sueco, Holger Hyden, concibió técnicas mediante las cuales se podían separar células individuales del cerebro y analizarlas para verificar su contenido de ARN. Este científico colocó a las ratas de laboratorio en unas condiciones especiales que les obligaban a aprender nuevas habilidades, tales como mantener el equilibrio sobre un alambre durante largos periodos de tiempo.

En 1959, descubrió que las células cerebrales de las ratas obligadas a este aprendizaje aumentaban su contenido de ARN en un 12 % mas que las células de otras ratas cuya vida se desarrollaba normalmente.

La molécula de ARN es tan grande y compleja que, si cada unidad de memoria almacenada estuviera constituida por una molécula de ARN de distinto tipo, no necesitaríamos preocuparnos acerca de la capacidad. Existen tantos patrones diferentes de ARN que incluso el número de mil billones es insignificante en comparación.

Pero, ¿deberíamos considerar el ARN como elemento aislado? Las moléculas de ARN se forman en los cromosomas con arreglo al esquema de las moléculas de ADN. ¿No será que cada persona lleva consigo una gran reserva de memorias potenciales —«un banco de memoria», por así decirlo— en sus moléculas de ADN, solicitadas y activadas *por* los acontecimientos corrientes con las adecuadas modificaciones? y ¿acaso el ARN representa el fin? La función primaria del ARN es la de formar moléculas proteínicas específicas. ¿Será la proteína y no el ARN lo que esté relacionado verdaderamente con la función «memoria»? Una forma de verificarlo es el empleo de cierta droga llamada «puromicina», que intercepta la formación de proteínas por el ARN. El matrimonio americano Louis Barkhouse Flexner y Josepha Barbar Flexner, trabajando en equipo, condicionaron unos cuantos ratones para resolver un laberinto e inmediatamente después les inyectaron puromicina. Los animales olvidaron todo lo aprendido. La molécula de ARN estaba todavía allí, pero no podía formar la molécula proteínica básica. Mediante el empleo de la puromicina, los Flexner demostraron que, por ese conducto, se podía borrar la memoria de corto plazo. Presumiblemente, en este último caso se habían formado ya las proteínas. No obstante, también era posible que la memoria fuera más sutil y no hubiera forma de explicarla en el simple plano molecular. Según ciertos indicios, también pueden mediar ahí los esquemas de la actividad neural. Evidentemente, queda todavía mucho por hacer.

Retroacción O Retrorregulación

El ser humano no es una máquina, y la máquina no es un hombre, pero a medida que avanza la ciencia y la tecnología, el hombre y la máquina parecen diferenciarse cada vez menos.

Si se analiza lo que hace el hombre, uno de los primeros pensamientos que se nos ocurren es que cualquier otro organismo vivo es un sistema que se autorregula.

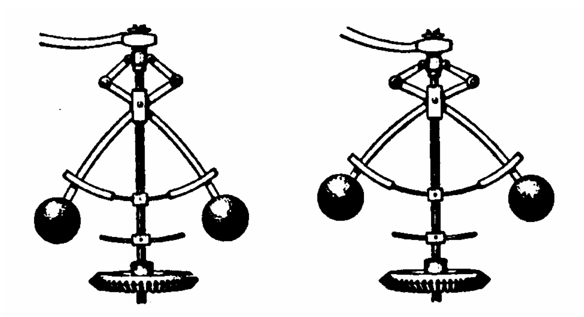
Es capaz de controlarse no sólo a sí mismo, sino, además, de modificar su ambiente. Resuelve los problemas que las modificaciones en el medio ambiente pueden plantearle, no doblegándose a ellas, sino reaccionando de acuerdo con sus propios deseos y esquemas. Permítasenos considerar más detenidamente cómo una máquina puede llegar a hacer lo mismo.

La forma más sencilla de dispositivo mecánico que se autorregula es la válvula de seguridad. Una versión muy elemental de ésta se halla en las ollas de presión, inventadas por Denis Papin, en 1679. Para mantener cerrada la válvula y contrarrestar la presión del vapor, colocó un peso sobre ella, pero empleó un peso lo suficientemente ligero para que la válvula pudiera abrirse antes de que la presión alcanzara tal grado que la olla explotara. La olla de presión actual, utilizada en el hogar, tiene dispositivos más sofisticados para este fin (tales como un cierre que se funde cuando la temperatura se eleva excesivamente), pero el principio en que se basa es el mismo.

Por supuesto, éste es un tipo de regulación que funciona sólo una vez. Pero es fácil pensar en ejemplos de regulación continua. Un tipo primitivo fue un dispositivo patentado, en 1745, por un inglés, Edmund Lee, para que las aspas de un molino de viento siempre se hallaran situadas perpendicularmente a la dirección en que soplaba el viento. Ideó una especie de cola con pequeñas aletas que recibían el impulso del aire, cualquiera que fue se la dirección en que soplaba el aire; el giro de estas aletas ponía en movimiento una serie de engranajes que hacían girar las aspas, de tal modo que sus brazos principales eran movidos por el aire en la nueva dirección.

En esta posición, la cola permanecía inmóvil; sólo giraba cuando las aspas no se hallaban encaradas con el aire.

Pero el arquetipo de todo autorregulador mecánico es la válvula inventada por James Watt, para su máquina de vapor. Para mantener constante la salida del vapor de su máquina. Watt concibió un dispositivo que consistía de un eje vertical con dos pesos unidos a él lateralmente mediante varillas deslizantes, que permitían a los pesos ascender y descender. La presión del vapor hacía girar el eje. Cuando aumentaba la presión del vapor, el eje giraba más de prisa y la fuerza centrífuga hacía que los pesos se elevaran. Al moverse, cerraban parcialmente la válvula, impidiendo la salida del vapor. Cuando la presión del vapor descendía, el eje giraba con menos rapidez, la gravedad empujaba los pesos hacia abajo y la válvula se abría.


Regulador de Watt.

Así, la válvula de Watt controlaba la velocidad del eje y, por tanto, la fuerza liberada, manteniéndola a un nivel uniforme. Cualquier desviación de ese nivel ponía en marcha una serie de fenómenos que corregían la desviación. Esto se denomina retrorregulación o retroacción: la propia desviación genera continuamente información en sentido retrógrado y sirve para medir la corrección requerida. Un ejemplo moderno muy familiar de un dispositivo de retrorregulación es el «termostato», usado en su forma más primitiva por el inventor holandés Comelis Drebble, a principios del siglo XVII. Una versión más sofisticada, aún empleada, fue inventada, en principio, por un químico escocés llamado Andrew Ure, en 1830. Su componente esencial consiste en dos tiras de metales distintos puestas en contacto y soldadas. Dado que estos metales se dilatan y contraen a diferentes velocidades con los cambios de temperatura, la tira se dobla. Cuando el termostato se encuentra, por ejemplo, a 21º C y la temperatura de la habitación desciende por debajo de ésta, el par termoeléctrico se dobla de tal manera que establece un contacto que cierra un circuito eléctrico, el cual, a su vez, pone en marcha el sistema de calefacción. Cuando la temperatura asciende por encima de los 21º C, el par termoeléctrico vuelve a flexionarse, en sentido contrario, lo suficiente como para abrir el circuito. Así, el calentador regula su propia operación mediante un mecanismo de retroacción. Es la retroacción la que de forma similar controla las actividades del cuerpo humano. Consideremos, por ejemplo, uno de los muchos

que existen, tal como el nivel de glucosa en sangre, que es controlado por el páncreas, glándula productora de insulina, del mismo modo que la temperatura de una casa es regulada por el sistema de calefacción, y del mismo modo que la actividad de éste es regulada por la desviación de la temperatura de su valor normal, así la secreción de insulina es regulada por la desviación de la concentración de glucosa con respecto a la normal. Un nivel demasiado elevado de glucosa determina la liberación de insulina, del mismo modo que una temperatura demasiado baja pone en marcha el calentador. De forma similar, al igual que un termostato puede ser ajustado a una temperatura más alta, así también una modificación interna en el organismo, tal como la determinada por la secreción de adrenalina, puede incrementar la actividad del cuerpo humano hasta un nuevo valor normal, por así decirlo.

La autorregulación en los organismos vivos, para mantener un valor normal constante, denominada «homeostasis» por el fisiólogo americano Walter Bradford Cannon, fue un claro exponente de la investigación del fenómeno en la primera década del siglo XX.

La mayor parte de los sistemas, vivos e inanimados, muestran un cierto retraso en su respuesta a la retroacción. Por ejemplo, después de que un calentador ha sido apagado, continúa durante un cierto tiempo emitiendo calor residual; inversamente, cuando se enciende, tarda un rato en calentarse. Por tanto, la temperatura en la habitación no llega a alcanzar los 21º C, sino que oscila alrededor de este valor; siempre excede de este nivel en un sentido u otro. Este fenómeno, llamado de fluctuación, se estudió por vez primera, en 1830, por George Airy, el Astrónomo Real de Inglaterra, en relación con dispositivos que había ideado para mover automáticamente los telescopios, sincrónicamente con el movimiento de la Tierra.

El fenómeno de la fluctuación es característico de la mayor parte de los procesos en el ser vivo, desde el control del nivel de glucosa en sangre hasta el comportamiento consciente. Cuando se desea coger un objeto, el movimiento de la mano no es un movimiento simple, sino una serie de movimientos ajustados continuamente, tanto en su velocidad como en su dirección, corrigiendo los músculos las desviaciones de la línea de movimiento apropiada, en el que son corregidas aquellas desviaciones por el ojo. Las correcciones son tan automáticas que no se tiene noción de ellas. Pero al contemplar a un niño, que aún no tiene práctica en la retroacción visual, e intenta coger alguna cosa, se aprecia que realiza movimientos en exceso o en defecto, porque las correcciones musculares no son suficientemente precisas. Y las víctimas de una lesión nerviosa que interfiere la capacidad para utilizar la retroacción visual presentan patéticas oscilaciones, o una acusada fluctuación, cuando intentan realizar un movimiento muscular coordinado.

La mano normal, con práctica, se mueve suavemente hacia su objetivo, y se detiene en el momento oportuno, debido a que en el centro de control prevé lo que ocurriría y realiza las correcciones con antelación. Así, cuando un coche gira en una esquina, se empieza a dejar el volante antes de haber dado la vuelta, de tal modo que las ruedas se hallen derechas en el momento que se ha rodeado la esquina. En otras palabras, la corrección se aplica en el momento adecuado, para evitar que se rebase el limite en un grado significativo.

Evidentemente, el principal papel del cerebelo es controlar este ajuste del movimiento por retroacción. Prevé y predice la posición del brazo algunos momentos antes, organizando el movimiento de acuerdo con ello. Mantiene los potentes músculos de la espalda en tensiones que varían constantemente, al objeto de conservar el equilibrio y la posición erecta. Es una pesada tarea hallarse de pie y no hacer nada; todos sabemos lo cansado que puede ser el permanecer de pie.

Ahora bien, este principio puede aplicarse a la máquina. Las cosas pueden disponerse de tal modo que, cuando el sistema se aproxima a la condición deseada, el margen cada vez menor entre su estado actual y el estado deseado ponga en marcha automáticamente la fuerza correctora, antes de que se exceda el límite deseado. En 1868, un ingeniero francés, Léon Farcot, aplicó este principio para inventar un control automático para un timón

de barco accionado a vapor. Cuando el timón alcanzaba la posición deseada, su dispositivo cerraba automáticamente la válvula de vapor; cuando el timón alcanzaba la posición específica, ya se había reducido la presión del vapor. Si el timón se separaba de esta posición, su movimiento abría la válvula apropiada, de tal modo que recobraba su posición original. Este dispositivo fue denominado «servomecanismo», y, en un cierto sentido, inició la era de la «automatización» (un término creado, en 1946, por el ingeniero americano D. S. Harder).

En realidad, los servomecanismos no adquirieron personalidad propia hasta el advenimiento de la electrónica. La aplicación de la electrónica permitió conferir a los mecanismos una sensibilidad y celeridad de respuesta superiores a las de un organismo vivo. Además, la radio extendió su esfera de acción a una considerable distancia. La bomba volante alemana de la Segunda Guerra Mundial era esencialmente un servomecanismo volante, e introdujo la posibilidad no sólo de los proyectiles dirigidos, sino también de los vehículos automáticos u operados a distancia de cualquier tipo, desde los trenes subterráneos a las aeronaves. Debido a que los militares han mostrado un gran interés por estos dispositivos, y las ingentes inversiones que por tal motivo se han realizado en este campo, los servomecanismos han alcanzado, quizá, su mayor desarrollo en los mecanismos de puntería y disparo de las armas y cohetes. Estos sistemas pueden detectar un objetivo que se mueve rápidamente a cientos de kilómetros de distancia, calcular instantáneamente su curso (teniendo en cuenta la velocidad de movimiento del objetivo, la velocidad del viento, las temperaturas de las diversas capas de aire, y otras muchas circunstancias), y dar en el blanco con gran exactitud, todo ello sin el control humano del proceso.

La automatización halló un ardiente teórico y abogado en el matemático Norbert Wiener. Hacia la década de 1940, él y su grupo, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, elaboraron algunas de las leyes matemáticas básicas que gobiernan la retroacción. Este científico denominó a este campo de estudio «cibernética», de la palabra griega «timonel», que parece apropiado, ya que los servomecanismos se usaron por vez primera en relación -con un timonel. (La cibernética también guarda relación con la válvula centrífuga de Watt, pues la palabra «regulador», término con el que también se conoce a esta válvula, procede de la palabra latina timonel.)

Desde la Segunda Guerra Mundial, la automatización ha progresado considerablemente, en particular en los Estados Unidos y en la Unión Soviética. Las refinerías de petróleo y las fábricas de objetos, tales como radios y pistones de aluminio, funcionan con procesos casi completamente automáticos, entrando las materias primas por un extremo y saliendo por el otro los productos acabados, siendo manipulados los procesos por máquinas autorreguladas. La automatización incluso ha invadido el agro: ingenieros en la Universidad de Wisconsin anunciaron, en 1960, un sistema de almacenamiento-alimentación automatizado, en el que las máquinas podrían alimentar cada almacén con la cantidad correcta del tipo adecuado de alimentos en el momento adecuado. .

En cierto sentido, la automatización señala el principio de una nueva Revolución Industrial. Al igual que la primera revolución, puede crear problemas de ajuste, no sólo para los trabajadores, sino también para la economía en general. Existe la anécdota de un ejecutivo de automóviles que acompañaba a un miembro sindical en su recorrido por una nueva factoría automática e hizo la observación: «Creo que podría obtener las cuotas que debemos abonar al sindicato a partir de estas máquinas.» El representante sindical respondió: «¿No sería usted capaz de venderles automóviles también?» La automatización no hará innecesario al trabajador humano, lo mismo que tampoco lo hizo la máquina de vapor o la electricidad. Pero, realmente, supondrá una gran desviación de las normas vigentes. La primera Revolución Industrial hizo que ya no fuera necesario que el hombre fuera un «animal de carga». La segunda hará innecesario que se convierta en un dispositivo automático sin inteligencia.

De forma natural, la retroacción y los servomecanismos han atraído tanto la atención de los biólogos como de los ingenieros.

Las máquinas que se autorregulan pueden servir como modelos simplificados para el estudio de la actividad del sistema nervioso. Hace una generación, la imaginación de los seres humanos fue excitada —y trastornada— por la obra de Karel Capek, *R.U.R.* («Robots Universales de Rossem»; la palabra robot procede de la checa que significa «trabajar»). En los últimos años, los científicos han empezado a experimentar con diferentes formas de robots (ahora llamados usualmente «autómatas»), no como simples sustitutos mecánicos para el ser humano, sino como herramientas para explorar la naturaleza de los organismos vivos. Por ejemplo, L. D. Harmon de la «Bell Telephone Laboratories», ideó un circuito transistorizado que, al igual que una neurona, emitía impulsos eléctricos cuando era estimulado. Tales circuitos podían ser acoplados a dispositivos que reproducían algunas de las funciones del ojo y del oído. En Inglaterra, el biólogo W. Ross Ashby creó un sistema de circuitos que exhibía respuestas reflejas simples. Llamó a su criatura un «homeostato», debido a que tendía a mantener por sí mismo un estado estable.
El neurólogo británico W. Grey Walter ideó un sistema más elaborado, que exploraba y reaccionaba a su medio ambiente. Su sistema, similar a una tortuga, que llamó «testudo» (de la palabra latina tortuga), tiene una célula fotoeléctrica, que hace las veces de ojo, un dispositivo sensible para descubrir los objetos, y dos motores, uno para moverse hacia delante y hacia atrás y otro para girar. En la oscuridad, da vueltas en amplios círculos. Cuando toca un obstáculo, retrocede un poco, se vuelve ligeramente y de nuevo vuelve a avanzar; hace esto hasta que salva el obstáculo. Cuando su ojo fotoeléctrico ve una luz, el motor para el giro empieza a funcionar, y el «testudo» avanza en dirección rectilínea hacia la luz, ésta aumenta su brillantez, lo cual determina que el dispositivo retroceda, de tal modo que así evita el error cometido por la polilla. Cuando sus baterías están a punto de agotarse, el testudo, ahora «hambriento», puede aproximarse lo bastante a la luz como para establecer contacto con un elemento eléctrico próximo a la bombilla que emite luz. Una vez recargadas, es de nuevo lo suficientemente sensible como para retirarse del área de brillo intenso en torno a la luz.
El tema de los autómatas nos hace recordar las máquinas que en general imitan los sistemas vivientes. En cierto modo, los seres humanos, como fabricantes de herramientas, han imitado siempre todo cuanto veían a su alrededor en la Naturaleza. El cuchillo es un colmillo artificial; la palanca, un brazo artificial; la rueda tuvo como modelo el rodillo, que a su vez se inspiró en el tronco rodante de árbol, y así sucesivamente.
Sin embargo, hasta fechas muy recientes no se han aplicado todos los recursos de la ciencia para analizar el funcionamiento de los tejidos y órganos vivientes al objeto de poder imitar su actuación —perfeccionada a fuerza de tesón y errores durante miles de millones de años de evolución— en las máquinas de factura humana. Este estudio se denomina «biónica», un término acuñado por el ingeniero americano Jack Steele, en 1960, y sugerido por el concepto biología electrónica, de mucho más alcance.
Para dar un ejemplo de lo que podría hacer la «biónica» consideremos la estructura de la piel del delfín, Los delfines nadan a una velocidad que requeriría 2,6 HP si el agua en torno suyo fuera tan turbulenta como lo sería alrededor de una embarcación del mismo tamaño aproximadamente. Por razones desconocidas, el agua roza los flancos del delfín sin turbulencias, y por tanto, se requiere escasa energía para vencer su resistencia. Aparentemente, esto obedece a la naturaleza de la piel del delfín. Si pudiéramos reproducir ese efecto en los costados de un buque, sería posible aumentar la velocidad de un trasatlántico y reducir su consumo de combustible al mismo tiempo.
Más tarde, el biofísico americano Jerome Lettvin estudió también minuciosamente la retina de la rana, insertando diminutos electrodos de platino en su nervio óptico.
Resultó que la retina no transmitía únicamente una mezcla de luz y puntos negros al cerebro dejando que éste hiciera toda la interpretación. En realidad, hay cinco tipos diferentes de células en la retina, designado cada uno para realizar un trabajo especifico. Uno reacciona ante los perfiles, es decir ante los

súbitos cambios producidos por la iluminación tal como el perfil de un árbol destacándose en el fondo del cielo. Otro reacciona ante los objetos curvados oscuros (los insectos que devora la rana). Un tercero lo hace ante cualquier cosa de rápidos movimientos (una criatura peligrosa a la que conviene evitar). El cuarto reacciona ante la luz crepuscular, y el quinto, ante el azul acuoso de un estanque. En otras palabras, el mensaje de la retina va al cerebro cuando ya se le ha analizado hasta cierto grado. Si los órganos sensoriales fabricados por el hombre actuasen como la retina de la rana, serían mucho más sensitivos y diversificados.
Ahora bien, si queremos construir una máquina que imite cualquier mecanismo viviente, la posibilidad más atractiva será la imitación de ese artificio único que despierta nuestro más profundo interés: el cerebro humano.

Máquinas Pensantes

¿Podemos construír una máquina que piensa? Para intentar responder a esta pregunta, primero debemos definir lo que es «pensar».
Evidentemente, podemos elegir las matemáticas como representación de una forma de pensar. Es un ejemplo particularmente adecuado para nuestros fines. Por un motivo, es claramente un atributo humano. Algunos organismos superiores son capaces, de distinguir entre tres objetos y cuatro, digamos, pero ninguna especie, salvo el *Homo sapiens*, puede realizar la simple operación de dividir tres cuartos por siete octavos. En segundo lugar las matemáticas suponen un tipo de razonamiento que opera con reglas fijas e incluye (idealmente) términos o procedimientos no indefinidos. Puede ser analizado de una forma más concreta y más precisa que puede serlo el tipo de pensamiento que se aplica, dijimos, a la composición literaria o a las altas finanzas o a la dirección industrial o a la estrategia militar. Ya en 1936, el matemático inglés Alan Mathison Turing demostró que todos los problemas podían resolverse mecánicamente si podía expresarse en forma de un número finito de manipulaciones que pudiesen ser admitidas por la máquina. Así, pues, consideremos las máquinas en relación con las matemáticas.
Las herramientas que ayudan al razonamiento matemático son indudablemente tan viejas como las propias matemáticas. Las primeras herramientas para dicho objeto tienen que haber sido los propios dedos del ser humano. El ser humano utilizó sus dedos para representar los números y combinaciones de números. No es un accidente que la palabra «dígito» se utilice tanto para designar el dedo de la mano o el pie y para un número entero. A partir de ahí, otra fase ulterior condujo al uso de otros objetos distintos de los dedos —pequeñas piedras, quizá. Hay más piedrecitas que dedos, y los resultados intermedios pueden conservarse como referencia futura en el curso de la resolución del problema. De nuevo, no es accidental que la palabra «calcular» proceda de la palabra latina para designar una piedrecita.—
Piedrecitas o cuentas alineadas en ranuras o cordones fijados a un armazón forman el ábaco; la primera herramienta matemática realmente versátil. Con ese aparato es fácil representar las unidades, decenas, centenas, millares, etc. Al mover las bolas, o cuentas de un ábaco, puede realizarse fácilmente una suma, como 576 + 289. Además, cualquier instrumento que puede sumar también puede multiplicar, pues la multiplicación sólo es una adición repetida. Y la multiplicación hace posible la potenciación, pues ésta representa sólo una multiplicación repetida (por ejemplo, 4^5 es igual a 4 x 4 x 4 x 4 x 4). Por último, invirtiendo la dirección de los movimientos, por represarlo así, son posibles las operaciones de sustracción, división y extracción de una raíz.
El ábaco puede ser considerado el segundo «computador digital». (El primero, por supuesto, lo constituyeron los dedos.)
Durante miles de años, el ábaco fue la herramienta más avanzada de cálculo. Su uso decayó en Occidente tras la desaparición del Imperio romano y fue reintroducido por el Papa Silvestre II, aproximadamente 1000 años d. de J.C., probablemente a partir de la España árabe, donde su uso había persistido. Al retornar, fue acogido como una novedad oriental, olvidándose su origen occidental.

El ábaco no fue remplazado hasta que se introdujo una anotación numérica que imitaba la labor del ábaco. (Esta numeración, los para nosotros familiares «números arábigos», tuvo su origen en la India, aproximadamente unos 800 años d. de J.C., fue aceptada por los árabes, y finalmente introducida en Occidente, hacía el año 1200 d. de J.C., por el matemático italiano Leonardo de Pisa.)

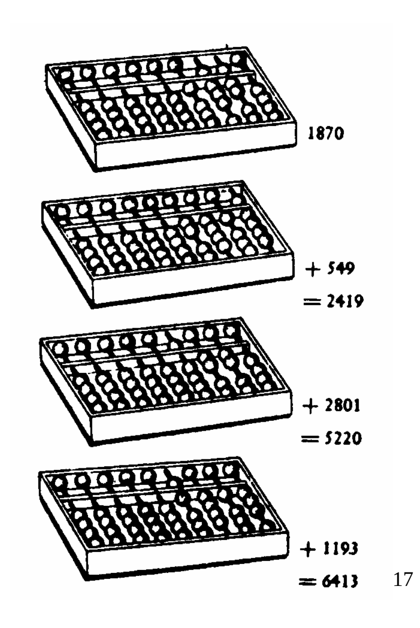
En la nueva numeración, las nueve piedrecitas diferentes en la fila de las unidades del ábaco fueron representadas por nueve símbolos diferentes, y estos mismos nueve símbolos se utilizaron para la fila de las decenas, para la de las centenas y para la de los millares. Las cuentas o piedrecitas, que diferían sólo en la posición, fueron remplazadas por símbolos que se diferenciaban únicamente en la posición, de tal modo que el número escrito 222, por ejemplo, el primer 2 representaba doscientos, el segundo veinte y el tercero representaba el propio dos: es decir 200 + 20 + 2 = 222.

Esta «numeración posicional» fue posible al reconocer un hecho importantísimo, que los antiguos utilizadores del ábaco no habían apreciado. Aún cuando sólo existen nueve cuentas en cada fila del ábaco, en realidad son posibles diez disposiciones. Además de usar cualquier número de cuentas, desde el 1 al 9, en una fila, también es posible no usar ninguna cuenta, es decir, dejar vacía la disposición. Esto no fue imaginado por los grandes matemáticos griegos y sólo en el siglo IX, cuando un desconocido hindú pensó en representar la décima alternativa mediante un símbolo especial, que los árabes denominaron *sifr* (vacío) y que ha llegado hasta nosotros, en consecuencia, como «cifras» o, en una forma más corrupta, «cero». La importancia del cero aparece reflejada en el hecho que la manipulación de números se denomina algunas veces «cifrar», y que para resolver cualquier problema difícil, se precisa «descifrarlo».

Se desarrolló otra poderosa herramienta con el uso de los exponentes para expresar las potencias de los números. Expresar 100 como 10^2, 1.000 como 10^3, 100.000 como 10^5, y así sucesivamente, tiene grandes ventajas en varios aspectos; no sólo simplifica la escritura de números de muchas cifras, sino que además reduce la multiplicación y la división a la simple adición o sustracción de exponentes (por ejemplo, $10^2 \times 10^3 = 10^5$) y la potenciación o extracción de una raíz a la simple realización de una multiplicación o división de exponentes (por ejemplo, la raíz cúbica de 1.000.000 es igual a $10^{6/3} = 10^2$). Ahora bien, muy pocos números pueden escribirse en una forma exponencial sencilla.

¿Qué podría hacerse con números tales como 111? La respuesta a esta pregunta dio lugar a la tabla de logaritmos.

El primero en considerar este problema fue el matemático escocés del siglo XVII John Napier. Evidentemente, expresar un número como 111 con una potencia de 10 implica asignar un exponente fraccionario a 10 (el exponente se encuentra entre dos y tres). En términos más generales, el exponente siempre será fraccionado si el número en cuestión no es un múltiplo del número base. Napier desarrolló un método para calcular los exponentes fraccionarios de los números, y denominó a estos exponentes «logaritmos». Poco después, el matemático inglés Henry Briggs simplificó la técnica y elaboró logaritmos con diez como base.



[17]

[17] Sumando con un ábaco. Cada bola bajo la barra vale por 1; cada bola sobre la barra vale por 5. Una bola marca una cantidad al ser movida hacia la barra. En el cuadro que aparece en la parte superior, la columna de la derecha señala 0; la que está a la izquierda de ésta señala 7 o (5 + 2), la que está a su lado marca 8 o (5 + 3); el contiguo 1: la cifra resultante es, pues, 1870. Si a esta cantidad se añade 549, la columna de la derecha se convierte en 9 o (9 + 0); la siguiente suma (4 + 7) se convierte en 1, llevándose 1, lo que significa que en la columna contigua se sube una bola; la tercera suma es 9 + 5, o 4 llevándose 1; la cuarta suma es 1 + 1, o 2; la suma arroja 2.419, según muestra el ábaco. La simple maniobra de llevarse 1 moviendo hacia arriba una bola en la columna adjunta posibilita calcular con gran rapidez; un operador experto puede sumar con más rapidez

Los logaritmos de Briggs son menos adecuados para el cálculo, pero gozan de más popularidad para los cálculos ordinarios. Todos los exponentes no enteros son irracionales, es decir, no pueden ser expresados en forma de una fracción ordinaria. Sólo pueden serlo como una expresión decimal infinitamente larga, que carece de un modelo repetitivo determinado. Sin embargo, tal decimal puede ser calculado con tantos números como sea necesario para la deseada precisión.

Por ejemplo, supongamos que deseamos multiplicar 111 por 254. El logaritmo de Briggs de 111, hasta cinco cifras decimales, es 2,04532, y para 254 es de 2,40483. Sumando estos logaritmos obtenemos $10^{2,04532}$ x $10^{2,40483} = 10^{4.45015}$. Este número sería aproximadamente de 28.194, el producto real de 111 x 254. Si deseamos obtener una mayor exactitud, podemos utilizar los logaritmos con seis o más cifras decimales.

Las tablas de logaritmos simplificaron el cálculo enormemente. En 1622, un matemático inglés llamado William Oughtred hizo las cosas aún más fáciles al idear la «regla de cálculo». Se marcan dos reglas con una escala logarítmica, en la que las distancias entre los números se hacen cada vez más cortas a medida que los números aumentan; por ejemplo, la primera división tiene los números del 1 al 10; la segunda división, de la misma longitud, tiene los números del 10 al 100; la tercera, del 100 al 1.000, y así sucesivamente. Deslizando una regla a lo largo de la otra hasta una posición apropiada, puede leerse el resultado de una operación que implique la multiplicación o la división. La regla de cálculo convierte los cálculos en algo tan fácil como la adición y sustracción en el ábaco, aunque en ambos casos, para estar más seguros, hay que especializarse en el uso del instrumento.

El primer paso hacia la máquina de calcular realmente automática se dio en 1642 por el matemático francés Blaise Pascal. Inventó una máquina de sumar que eliminó la necesidad de mover las

que una máquina sumadora, según quedó demostrado en una prueba efectuada en 1946.

bolas separadamente en cada fila del ábaco. Su máquina consistía de una serie de ruedas conectadas por engranajes. Cuando la primera rueda —la de las unidades— giraba diez dientes hasta su marca cero, la segunda rueda giraba un diente hasta el número uno, de tal modo que las dos ruedas juntas mostraban el número diez. Cuando la rueda de las decenas alcanzaba el cero, la tercera de las ruedas giraba un diente del engranaje, mostrando el ciento, y así sucesivamente. (El principio es el mismo que el del cuentakilómetros de un automóvil.) Se supone que Pascal construyó más de 50 de esas máquinas; al menos cinco existen todavía.

El aparato de Pascal podía sumar y restar. En 1674, el matemático alemán Gottfried Wilhelm von Leibniz avanzó un paso más y dispuso las ruedas y engranajes de tal modo que la multiplicación y la división fueron tan automáticas y fáciles como la adición y la sustracción. En 1850, un inventor norteamericano llamado D. D. Parmalee realizó un importante avance, que convertía la máquina de calcular en un dispositivo muy conveniente. En lugar de mover las ruedas a mano, introdujo una serie de llaves —pulsando una llave marcada con el dedo giraban las ruedas hasta el número correcto. Éste es el mecanismo de la ahora familiar y ya anticuada caja registradora.

Sólo restaba electrificar la máquina (de tal modo que los motores hicieran el trabajo dictado por la presión aplicada a las llaves), y el dispositivo de Pascal-Leibniz se convirtió en el moderno computador de mesa.

Sin embargo, el computador de mesa representa una vía muerta, no un camino hacia el futuro. El computador que tenemos en la mente cuando consideramos a las, máquinas pensantes es algo totalmente distinto. Su antecesor es una idea concebida ya en el siglo XIX por un matemático inglés llamado Charles Babbage. Babbage, un verdadero genio, que se adelantó mucho a su época, ideó una máquina analítica que era capaz de realizar cualquier operación matemática, ser instruida mediante tarjetas perforadas, almacenar números en un dispositivo de memoria, comparar los resultados de operaciones, etc. Trabajó en sus ideas durante 37 años, gastando una fortuna, la suya y la del Gobierno, colocando elaboradas estructuras de ruedas, engranajes, palancas y alambres, en una época en que cada parte tenía que ser construida a mano. Al final fracasó y murió como un ser incomprendido y desalentado, debido a que intentaba conseguir lo que no podía conseguirse con simples dispositivos mecánicos.

La máquina tuvo que esperar un siglo, hasta el desarrollo de la electrónica. Y la electrónica, a su vez, sugirió el uso de un lenguaje matemático mucho más fácil de manipular para la máquina que el sistema decimal de números. Se denomina «sistema binario» y fue inventado por Leibniz. Para comprender el computador moderno, debemos familiarizamos con este sistema.

La numeración binaria sólo usa dos números: el 0 y el 1. Expresa todos los números en términos de potencias de dos. Así, el número 1 es 2^0 el número 2 es 2^1, el 3 es $2^1 + 2^0$, el 4 es 2^2, y así sucesivamente. Como en el sistema decimal, la potencia viene indicada por la posición del símbolo. Por ejemplo, el número 4 es representado por 100, leyéndose así: $(1 \times 2^2) + (0 \times 2^1) + (0 \times 2^0)$, o $4 + 0 + 0 = 4$ en el sistema decimal.

Como ejemplo, permítasenos considerar el número 6.413. En el sistema decimal puede escribirse $(6 \times 10^3) + (4 \times 10^2) + (1 \times 10^1) + (3 \times 10^0)$; recordemos que cualquier número elevado a cero es igual a uno. Ahora bien, en el sistema binario sumamos números en forma de potencias de 2 en vez de potencias de 10 para componer un número. La potencia más alta de 2, que nos conduce más rápidamente al número 6.413 es 12: 2^{12} es 4.096. Si ahora añadimos 2^{11}, o 2.048, tenemos 6.144 que se diferencia en 269 del 6.413. Seguidamente, 2^8 añade 256 más, dejando como diferencia 13; luego, podemos añadir 2^3 u 8, dejando como diferencia 5; luego, 2^2 o 4, dejando como diferencia 1 y, por último, 2^0 que es 1. Así, podemos escribir el numero 6.413, como $(1 \times 2^{12}) + (1 \times 2^{11}) + (1 \times 2^8) + (1 \times 2^3)$ +,$(1 \text{ X } 2^2) + (1 \times 1^0)$. Pero como en el sistema decimal cada cifra de un número, leído desde la izquierda, debe representar la siguiente potencia más pequeña. Como en el sistema decimal, representamos las sumas de las potencias tercera, segunda, primera y cero de diez al expresar el número 6.413, de

tal modo que en el sistema binario debemos representar las adiciones de las potencias de 2 desde 12 a 0. En forma de tabla, esto podría leerse así:

$1 \times 2^{12} =$	4.096
$1 \times 2^{11} =$	2048
$0 \times 2^{10} =$	0
$0 \times 2^{9} =$	0
$1 \times 2^{8} =$	256
$0 \times 2^{7} =$	0
$0 \times 2^{6} =$	0
$0 \times 2^{5} =$	0
$0 \times 2^{4} =$	0
$1 \times 2^{3} =$	8
$1 \times 2^{2} =$	4
$0 \times 2^{1} =$	0
$1 \times 2^{0} =$	1
	6.413

Tomando los sucesivos multiplicadores en la columna de la izquierda. (del mismo modo que tomamos 6, 4, 1 y 3 como los multiplicadores sucesivos en el sistema decimal), escribimos el número en el sistema binario como 1100100001101.

Esto parece bastante innecesario. Se requieren trece cifras para escribir el número 6.413, mientras que el sistema decimal sólo precisa cuatro. Pero, para una computadora, este sistema es el más simple imaginable. Puesto que sólo existen dos cifras diferentes, cualquier operación puede realizarse en términos de sólo dos estados en un circuito eléctrico —conectado y desconectado. El circuito conectado (es decir circuito cerrado) puede re presentar el 1; el circuito desconectado (es decir el circuito abierto) puede representar el 0—.

Con los circuitos apropiados y el uso de diodos, la máquina puede efectuar todo tipo de operaciones matemáticas. Por ejemplo, con dos interruptores en paralelo puede realizar una adición: 0 + 0 = 0 (desconectado más desconectado = desconectado), y 0 + 1 = 1 (desconectado + conectado = conectado). De forma similar, dos interruptores en serie pueden efectuar una multiplicación: 0 x 0 = 0; 0 x 1 = 0; 1 x 1 = 1.

Hasta aquí, lo que ha aportado el sistema binario. Por lo que a la electrónica se refiere, su contribución a la computadora ha sido dotarla de una velocidad increíble. Puede realizar una operación aritmética casi instantáneamente: algunos computadores electrónicos pueden realizar miles de millones de operaciones por segundo. Cálculos que ocuparían a un hombre con un lápiz durante toda su vida, los realiza la computadora en unos pocos días. Citemos un caso típico, ocurrido antes de la era de las computadoras; un matemático inglés, llamado William Shanks, dedicó 15 años a calcular el valor de pi, que representa la relación de circunferencia de un círculo con su diámetro, y lo realizó hasta las 707 cifras decimales (calculando las últimas cien cifras erróneamente); recientemente, una computadora electrónica ha realizado el cálculo hasta las diez mil cifras decimales, precisando sólo unos pocos días para llevar a cabo la tarea.

En 1925, el ingeniero electricista norteamericano Vannevar Bush y su equipo construyeron una máquina capaz de resolver ecuaciones diferenciales. Ésta fue la primera computadora moderna, aunque todavía usaba interruptores mecánicos, y representó una versión satisfactoria del tipo de aparato que Babbage había inventado un siglo antes.

Sin embargo, para que la utilidad del aparato sea máxima, los interruptores han de ser electrónicos. Esto aumenta extraordinariamente la velocidad de la computa dora, pues un flujo de electrones puede ser iniciado, desviado o interrumpido en millonésimas de segundo —mucho más rápidamente de lo que los interruptores mecánicos, aunque delicados, podrían ser manipulados.

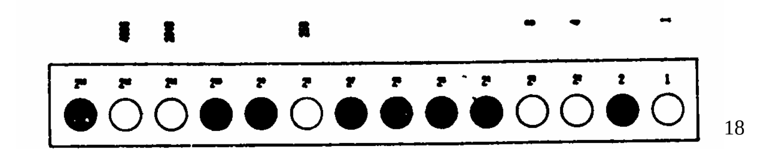
La primera computadora electrónica grande, que contenía 19.000 tubos de vacío, se construyó en la Universidad de Pennsylvania por John Presper Eckert y John William Mauchly durante la Segunda Guerra Mundial, fue llamada ENIAC, de «*Electronic*

Numerical Integrator and Computer». ENIAC dejó de funcionar en 1955 y desmontada en 1957, por considerarla totalmente pasada de moda, con sólo doce años de vida; pero tras ella había quedado una descendencia sorprendentemente numerosa y sofisticada.

Mientras que ENIAC pesaba 30 *t* y necesitaba 400 m^2 de espacio, la computadora equivalente actual —utilizando componentes más pequeños, prácticos y seguros que los viejos tubos de vacío— no excede del tamaño de un refrigerador. Las computadoras modernas contienen medio trillón de componentes y 10 millones de elementos de memoria ultrarrápidos.

Fue tan rápido el progreso que, en 1948, comenzaron a construirse en cantidad pequeñas computadoras electrónicas; en el curso de cinco años, se estaban utilizando dos mil; en 1961, el número era de diez mil.

Las computadoras que operan directamente con números se llaman «computadoras digitales». Pueden actuar con cualquier exactitud deseada, pero sólo pueden responder el problema específico preguntado. Un ábaco, como he dicho antes, es un ejemplo primitivo. Una computadora debe operar no con números, sino con intensidades de corriente elaboradas para cambiar de forma análoga a las variables consideradas. Ésta es una «computadora electrónica digital»; un ejemplo famoso es el de «Universal Automatic Computer» (UNIVAC), construida por vez primera en 1951 y utilizada en Televisión, en 1952, para analizar los resultados de la elección presidencial a medida que iban conociéndose. El UNIVAC fue la primera computadora electrónica digital empleada con fines comerciales. La regla de cálculo es una computadora analógica muy simple. Las computadoras analógicas tienen una exactitud limitada, pero pueden proporcionar respuestas, de una vez, a toda una serie de cuestiones relacionadas.

 [18]

¿Es la ENIAC, o cualquiera de sus sofisticados descendientes, una verdadera «máquina pensante»? Es difícil, en esencia, no es más que un ábaco muy rápido. Simplemente, como un esclavo, sigue las instrucciones que se le han dado.

La herramienta básica para instruir a la maravilla a las computadoras es la tarjeta perforada, aún hoy día, similar a la que Babbage ideó para su uso. Un orificio perforado en una posición determinada sobre una tarjeta de este tipo puede significar un número; una combinación de dos o más de estos orificios, en posiciones específicas, puede significar una letra del alfabeto, una operación matemática, una cualidad —cualquier cosa que uno quiera representar—. Así pues, la tarjeta puede registrar un nombre de persona, el color de sus ojos y cabello, su posición social e ingresos, su estado civil, sus especiales capacidades o títulos profesionales. Cuando la tarjeta pasa entre polos eléctricos, los contactos efectuados a través de los orificios establecen un esquema eléctrico específico. Mediante el rastreo de las tarjetas de esta forma y selección de sólo aquellas que dan lugar a un tipo particular de esquema, la máquina puede seleccionar, a partir de una gran población, sólo aquellas personas que, supongamos, tienen una altura superior a 1,80 m, ojos azules y hablan ruso.

De forma semejante, una tarjeta perforada con un «programa» para una computadora establece circuitos eléctricos que determinan que la máquina introduzca ciertos números en determinadas operaciones. En todos los casos, excepto en los programas más sencillos, la computadora tiene que almacenar tales números o datos, hasta que puede utilizarlos en el curso de

---

[18] El número 6.413 representado por luces en un panel de computador. Los círculos claros son lámparas encendidas.

una serie de operaciones. Esto significa que debe poseer un dispositivo de memoria. La memoria, en una computadora moderna, por lo general es de tipo magnético: los números se almacenan en forma de manchas magnetizadas sobre un tambor o alguna otra disposición. Una mancha particular puede representar el número 1 cuando está magnetizada y el 0 cuando no lo está. Cada tipo de información es un «bit» (de *binary digit* = dígito binario). Las manchas son magnetizadas por una corriente eléctrica al registrar la información y también son leídas por una corriente eléctrica.

Sin embargo, ahora se pone claramente de manifiesto que la utilidad de la tarjeta perforada ha tenido su momento. Se están utilizando ya sistemas en que las instrucciones pueden ser proporcionadas a las computadoras (tal como la UNIVAC III, construida en 1960) mediante palabras inglesas mecanografiadas. La computadora es ideada para reaccionar de modo apropiado a ciertas palabras y combinaciones de palabras, que pueden ser usadas muy flexiblemente, pero según una serie de reglas definidas.

Tales «lenguajes de computadoras» han proliferado rápidamente. Uno de los mejor conocidos es el FORTRAN (abreviaturas para traducción de fórmulas = *formula translation*).

Por supuesto, la computadora es el instrumento que permite la automatización completa. Los servomecanismos sólo pueden realizar los aspectos de esclavo en una tarea.

En cualquier proceso complejo, tal como el de apuntar y disparar con una arma o el funcionamiento de una factoría automática, las computadoras son necesarias para calcular, interpretar, coordinar y supervisar —en otras palabras, actuar como mentes mecánicas para dirigir los músculos mecánicos—. Y la computadora no se halla limitada en modo alguno en este tipo de función. Realiza sus deseos eléctricos; calcula las reservas de plazas en las líneas aéreas; mantiene al día los registros de cheques y cuentas bancarias; confecciona las nóminas de una compañía, mantiene un registro diario de los inventarios, en resumen, realiza una gran parte de las tareas de las grandes compañías en la actualidad.

La velocidad de una computadora, y su inmunidad al cansancio, le permiten realizar tareas demasiado pesadas (aunque no necesariamente demasiado difíciles en principio) para el cerebro humano. La computadora puede analizar procesos puramente al azar, similares a las colisiones mutuas de miles de partículas al realizar «juegos» matemáticos que simulan tales procesos y seguir cientos de casos en períodos muy breves, con objeto de calcular las posibilidades de diversos fenómenos posibles. A esto se le denomina el «método de Montecarlo», ya que es el mismo principio usado por los jugadores humanos, que intentan usar algún sistema en el juego de la ruleta.

Los matemáticos, físicos e ingenieros que investigan los posibles usos de las computadoras están seguros de que sólo se está en los comienzos. Han programado computadoras para jugar al ajedrez, como un ejercicio para almacenar y aplicar información. (Por supuesto, la máquina sólo juega un partido mediocre, pero es muy probable que virtualmente sea posible programar una computadora para aprender de acuerdo con los movimientos de su contrario.)

En experiencias de laboratorio, las computadoras han sido programadas para asimilar artículos de revistas científicas, formar índices de tales artículos y traducirlos de un idioma a otro. Por ejemplo, con un vocabulario de palabras rusas y sus equivalentes inglesas almacenadas en su memoria, una computadora puede rastrear la letra rusa impresa, reconocer palabras claves y dar una traducción aproximada. Se está realizando una profunda investigación sobre este problema de la traducción mediante máquinas, debido que es tal el alud de bibliografía técnica que inunda al mundo, que los traductores humanos probablemente no podrán hacer frente a él.

Una computadora no sólo puede «leer», sino que también puede escuchar. Investigadores de los «Bell Telephone Laboratories» han construido una máquina llamada «Audrey», que puede distinguir las palabras del lenguaje ordinario. Seguramente, esto crea la posibilidad de que las computadoras puedan ser capaces algún día de «comprender» las instrucciones habladas. Es posible

que pueda programarse con máquinas el lenguaje e incluso las canciones.

En 1965 se crearon sistemas para permitir a personas o máquinas comunicarse con la computadora desde largas distancias, por medio de una máquina de escribir, por ejemplo. Este sistema recibe el nombre de *time-sharing* (tiempo repartido) porque muchas personas pueden utilizar la computadora al mismo tiempo, aunque la respuesta es tan rápida que cada usuario no advierte la presencia de los demás.

Hasta el momento, estos progresos se sugieren únicamente como posibilidades futuras. Las computadoras son rápidas y mucho más eficaces que el hombre para la realización de operaciones matemáticas ordinarias, pero no han alcanzado en modo alguno la flexibilidad de la mente humana. Mientras que incluso un niño que aprende a leer no tiene dificultad en reconocer que una b mayúscula, y una b minúscula, y una b en cursiva, en diversos cuerpos y tipos todas ellas proceden de una misma letra, por el momento esto no puede discernirlo una máquina como las que existen actualmente. Para obtener tal flexibilidad en una máquina, ésta debería tener unas dimensiones y complejidades prohibitivas. El cerebro humano pesa algo más de 1.200 g y actúa con una cantidad de energía prácticamente despreciable. Por el contrario, ENIAC, que probablemente fue un millón de veces menos compleja que el cerebro, pesaba 30 toneladas, y requería 150 kilovatios de energía. Por supuesto, aparatos tales como el transistor y el «criotrón», una clase de interruptor que emplea alambres superconductores a bajas temperaturas, han miniaturizado las computadoras y reducido las necesidades de energía. El uso de componentes de ferrita para almacenar «bits» de información ha aumentado la capacidad de la memoria de la computadora, porque los componentes pueden fabricarse de menores dimensiones. En la actualidad existen componentes de ferrita tan pequeños como un punto en esta página.

Minúsculos emparedados en forma de túnel y operando en condiciones superconductoras, llamados «neuristores», hacen suponer que sea posible ensamblarlos con la misma solidez y complejidad que las células en el cerebro humano. Así pues, quizá se perfile ya a lo lejos la posibilidad de reproducir las asombrosas cualidades de ese órgano que, con sus 1.200 g de peso, contiene unos diez mil millones de neuronas junto con noventa millones de células auxiliares.

A medida que, a una tremenda velocidad, las computadoras se hacen cada vez más intrincadas, sutiles y complejas, surge naturalmente la cuestión: aunque en la actualidad las computadoras no puedan realmente pensar. ¿llegará el día en que puedan hacerlo? Realmente, ya pueden calcular, recordar, asociar, comparar y reconocer.

¿Llegarán algún día a razonar? A este respecto, el matemático americano Marvin L. Minsky contesta que sí.

En 1938, un joven matemático e ingeniero norteamericano. Claude Elwood Shannon, expuso en su tesis doctoral que la lógica deductiva, en la forma conocida como álgebra de Boole, podía ser tratada mediante el sistema binario. El álgebra de Boole se refiere a un sistema de «lógica simbólica», sugerida en 1854 por el matemático inglés George Boole, en un libro titulado *An Investigation of the Laws of Thought* (Una investigación de las leyes del pensamiento). Boole observó que los tipos de afirmación empleados en la lógica deductiva podían ser representados mediante símbolos matemáticos, y se dedicó a demostrar cómo podían ser manipulados tres símbolos según reglas fijas para dar lugar a conclusiones apropiadas.

Para dar un ejemplo muy sencillo, consideremos la siguiente hipótesis: «ambos, A y B, son verdaderos». Hemos de determinar el carácter de veracidad o falsedad de esta teoría, simplemente mediante un ejercicio estrictamente lógico, suponiendo que sabemos que A y B, respectivamente, son ciertos o falsos. Para tratar el problema en términos binarios, como sugirió Shannon, permítasenos representar «falso» por 0 y «verdadero» por 1. Si los dos, A y B son falsos, entonces la hipótesis «*ambos, A y R son ciertos*» es falsa, en otras palabras, 0 y 0 dan 0. Si A es verdadera, pero B es falsa (o viceversa), entonces la hipótesis vuelve a ser falsa. Es decir 1 y 0 (o 0 y 1) dan 0.

Si A es verdadera y B es verdadera, la hipótesis «*ambos, A y B, son verdaderos*» es verdadera. Simbólicamente 1 y 1 dan 1.
Ahora bien, estas tres alternativas corresponden a las tres posibilidades de multiplicación en el sistema binario, a saber: 0 x 0 = 0, 1 x 0 = 0, y 1 x 1 = 1. Así, el problema lógico que aparece en la hipótesis «*ambos, A y B, son ciertos*» puede ser matemáticamente desarrollada por multiplicación. Una computadora (programada apropiadamente) puede, por tanto, resolver este problema lógico tan fácilmente y del mismo modo como realiza los cálculos ordinarios.
En el caso de que la afirmación «*A o B son ciertos*», el problema se soluciona por adición, en vez de por multiplicación. Si ni A ni B son ciertos, entonces esta hipótesis es falsa. En otras palabras 0 + 0 = 0. Si A es cierta y B es falsa, la afirmación es verdadera; en estos casos 1 + 0 = 1 y 0 + 1 = 1. Si ambos, A y B, son ciertos, la afirmación es realmente cierta, y 1 + 1 = 10. (El número significativo en el 10 es el 1; el hecho de que sea desplazado una posición no tiene importancia; en el sistema binario, 10 representa $(1 \times 2^1) + (0 \times 1^0)$, equivalente a 2 en el sistema decimal.)
El Álgebra de Boole; ha adquirido importancia en ingeniería de telecomunicaciones y constituye parte de lo que ahora conocemos como la «teoría de la información».
¿Qué es lo que queda del pensamiento que no puede ser adquirido por la máquina? Nos enfrentamos finalmente con la creatividad y la capacidad de la mente humana para tratar con lo desconocido: su intuición, capacidad de juicio y para sorprenderse ante una situación y sus posibles consecuencias —llámese como se quiera—. Esto también ha sido expresado en forma matemática, hasta cierto punto, por el matemático John von Neumann, quien, con el economista Oskar Morgenstern, escribieron *The Theory of Games and Economic Behavior* (La teoría de los juegos y el comportamiento económico), a principios de la década de 1940. Von Neumann tomó ciertos juegos sencillos, tales como tirar la moneda y el póquer, como modelos para el análisis de la situación típica en la que uno intenta hallar una estrategia para ganar a un oponente que está seleccionando asimismo la mejor forma posible de acción para sus propios fines. Las campañas militares, la competencia en los negocios, muchas cuestiones de gran importancia en la actualidad, implican decisiones de este tipo. Incluso la investigación científica puede ser considerada como un juego del hombre contra la Naturaleza, y la teoría de los juegos puede ser de utilidad para seleccionar la estrategia óptima de la investigación, suponiendo que la Naturaleza está barajando las cartas de un modo que enredará más al ser humano (lo que en realidad a menudo parece que hace).
Y cuando las máquinas amenazan con hacerse perceptiblemente humanas, los seres humanos se hacen más mecánicos. Los órganos mecánicos pueden remplazar a los corazones y los riñones orgánicos. Los dispositivos electrónicos pueden remediar los fallos orgánicos, de forma que es posible implantar en el cuerpo marcapasos artificiales para hacer funcionar los corazones que se pararían de otra forma. Se han concebido manos artificiales cuyos movimientos se pueden controlar mediante impulsos nerviosos amplificados en los brazos donde se han injertado. La palabra «ciborg» (cibernetic organism = organismo cibernético) se acuñó en 1960 para hacer referencia a los hombres amplificados mecánicamente.
Todos estos intentos de imitar la mente humana se hallan en su primera infancia. No podemos ver, en un futuro previsible, la posibilidad de que una máquina reproduzca la actividad del ser humano. Sin embargo, la senda se halla abierta y conjura pensamientos que son excitantes, pero también de alguna manera aterradores. Si el hombre eventualmente llega a producir una máquina, una criatura mecánica, igual o superior a sí mismo en todos los aspectos, inclusive en su inteligencia y creatividad, ¿qué es lo que ocurriría? ¿Remplazaría al ser humano, como el organismo superior en la Tierra ha remplazado o subordinado a los menos adaptados a lo largo de la historia de la evolución? Es un pensamiento desagradable: lo que nosotros representamos, por primera vez en la historia de la vida sobre la Tierra, es una especie capaz de elaborar su posible sustitución. Por supuesto, podemos evitar tal contingencia al impedir la construcción de máquinas que

sean demasiado inteligentes. Pero, no obstante, es tentador construirlas. ¿Qué mayor logro podría haberse alcanzado, que la creación de un objeto que sobrepasara al creador? ¿Cómo podríamos consumar la victoria de la inteligencia sobre la Naturaleza de forma más gloriosa que transmitiendo nuestra herencia de forma triunfal a una inteligencia mayor, elaborada por nosotros mismos?

APÉNDICE. Las Matemáticas En La Ciencia

Gravitación

Como se ha explicado en el capítulo 1, Galileo inició la ciencia en su sentido moderno introduciendo el concepto de razonamiento apoyado en la observación y en la experimentación de los principios básicos. Obrando así, introdujo también la técnica esencial de la medición de los fenómenos naturales con precisión y abandonó la práctica de su mera descripción en términos generales. En resumen, cambió la descripción cualitativa del universo de los pensadores griegos por una descripción cuantitativa.

Aunque la ciencia depende mucho de relaciones y operaciones matemáticas, y no existiría en el sentido de Galileo sin ellas, sin embargo, no hemos escrito este libro de una forma matemática y lo hemos hecho así deliberadamente. Las matemáticas, después de todo, son una herramienta altamente especializada. Para discutir los progresos de la ciencia en términos matemáticos, necesitaríamos una cantidad de espacio prohibitivo, así como un conocimiento sofisticado de matemáticas por parte del lector. Pero en este apéndice nos gustaría presentar uno o dos ejemplos de la manera en que se han aplicado las matemáticas sencillas a la ciencia con provecho. ¿Cómo empezar mejor que con el mismo Galileo?

Galileo (al igual que Leonardo da Vinci casi un siglo antes) sospechó que los objetos al caer aumentan constantemente su velocidad a medida que lo hacen. Se puso a medir exactamente en qué cuantía y de qué manera aumentaba la velocidad.

Dicha medición no podía considerarse fácil para Galileo, con los instrumentos de que disponía en 1600. Medir una velocidad requiere la medición del tiempo. Hablamos de velocidades de 1.000 km por hora, de 4 km por segundo.

Pero no había ningún reloj en tiempos de Galileo que diera la hora en intervalos aproximadamente iguales.

Galileo acudió a un rudimentario reloj de agua. Dispuso agua que goteaba lentamente de un pequeño tubo, suponiendo, con optimismo, que el líquido goteaba con una frecuencia constante. Este agua la recogía en una taza, y por el peso del agua caída durante el intervalo de tiempo en que un acontecimiento tenía lugar, Galileo medía el tiempo transcurrido. (En ocasiones, también utilizó el latido de su pulso con este propósito.) Sin embargo, una dificultad estribaba en que, al caer un objeto, lo hacía tan rápidamente que Galileo no podía recoger suficiente agua, en el intervalo de caída, como para poder pesarla con precisión. Lo que hizo entonces fue «diluir» la fuerza de la gravedad haciendo rodar una bola metálica por un surco en un plano inclinado. Cuando más horizontal era el plano, más lentamente se movía la bola. Así, Galileo fue capaz de estudiar la caída de los cuerpos en cualquier grado de «movimiento lento» que deseara.

Galileo halló que una bola, al rodar sobre un plano perfectamente horizontal, se movía con velocidad constante, (Esto supone una ausencia de rozamiento, una condición que podría presumirse dentro de los límites de las rudimentarias mediciones de Galileo.)

Ahora bien, un cuerpo que se mueve en una trayectoria horizontal lo hace formando ángulos rectos con la fuerza de gravedad. En tales condiciones, la velocidad de este cuerpo no es afectada por la gravedad de ninguna manera. Una bola que descansa sobre un plano horizontal permanece inmóvil, como cualquiera puede observar. Una bola impulsada a moverse sobre un plano horizontal lo hace con una velocidad constante, como observó Galileo.

Matemáticamente, entonces, se puede establecer que la velocidad *v* de un cuerpo, *en ausencia de cualquier fuerza exterior*, es una constante *k*, o:

$$v = k$$

Si *k* es igual a cualquier número distinto de cero, la bola se mueve con velocidad constante. Si *k* es igual a cero, la bola está en reposo; así, el reposo es un «caso particular» de velocidad constante.

Casi un siglo después, cuando Newton sistematizó los descubrimientos de Galileo referentes a la caída de cuerpos, este hallazgo se transformó en la Primera Ley del Movimiento (también llamada el «principio de inercia»). Esta ley puede expresarse así: todo cuerpo persiste en un estado de reposo o de movimiento uniforme rectilíneo, a menos que una fuerza exterior le obligue a cambiar dicho estado.

Cuando una bola rueda hacia abajo por un plano inclinado, no obstante, está bajo la continua atracción de la gravedad. Su velocidad entonces, como halló Galileo, no era constante, sino que se incrementaba con el tiempo. Las mediciones de Galileo mostraron que la velocidad aumentaba en proporción al período de tiempo *t*.

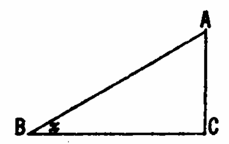
En otras palabras, cuando un cuerpo sufre la acción de una fuerza exterior constante, su velocidad, partiendo del reposo, puede ser expresada como:

$$v = k\,t$$

¿Cuál era el valor de *k?* Éste, como fácilmente se hallaba por experimentación, dependía de la pendiente del plano inclinado. Cuanto más cerca de la vertical se hallaba el plano, más rápidamente la bola que rodaba aumentaba su velocidad y mayor era el valor de *k.* El máximo aumento de velocidad aparecía cuando el plano era vertical, en otras palabras, cuando la bola caía bajo la fuerza integral de la gravedad. El símbolo g (por «gravedad») se usa cuando la fuerza íntegra de la gravedad está actuando, de forma que la velocidad de una bola en caída libre, partiendo del reposo, era:

$$v = g\,t$$

Consideremos el plano inclinado con más detalle, en el diagrama:



La longitud del plano inclinado es AB, mientras que su altura hasta el extremo superior es AC. La razón de AC a AB es el seno del ángulo *x*, usualmente abreviado como sen *x*.

El valor de esta razón —esto es, de sen *x*— puede ser obtenido de forma aproximada construyendo triángulos con ángulos particulares y midiendo realmente la altura y longitud implicadas en cada caso. O puede calcularse mediante técnicas matemáticas con toda precisión, y los resultados pueden incorporarse en una tabla. Usando dicha tabla, podemos hallar, por ejemplo, que sen 10º es aproximadamente igual a 0,17356, que sen 45º es aproximadamente igual a 0,70711, y así sucesivamente.

Hay dos importantes casos particulares. Supongamos que el plano «inclinado» es precisamente horizontal. El ángulo *x* es entonces cero, y como la altura del plano inclinado es cero, la razón de la altura a su longitud será también cero. En otras palabras, sen 0º = 0. Cuando el plano «inclinado» es precisamente vertical, el ángulo que forma la base es un ángulo recto, o de 90º. Su altura es entonces exactamente igual a su longitud, de forma que la razón de uno al otro es exactamente 1. Por tanto, sen 90º = 1.

Volvamos ahora a la ecuación que muestra que la velocidad de una bola rodando hacia abajo por un plano inclinado es proporcional al tiempo:

$$v = k\,t$$

Se puede probar empíricamente que el valor de *k* varía con el seno del ángulo, de forma que:

$$k = k' \text{ sen } x$$

(donde *k'* es utilizado para indicar una constante que es diferente de *k).*
(En honor a la verdad, el papel del seno en relación con el plano inclinado fue estudiado, con anterioridad a Galileo, por Simon Stevinus, quien también llevó a cabo el famoso experimento de dejar caer diferentes masas desde una cierta altura, un experimento tradicional, pero erróneamente atribuido a Galileo. Sin embargo, si Galileo no fue realmente el primero en experimentar y medir, sí lo fue en inculcar al mundo científico, de forma indeleble, la necesidad de experimentar y medir, y ésa es ya una gloria suficiente.) En el caso de un plano inclinado completamente vertical, el sen *x*

$$k = k'$$

se convierte en sen 90º, que es 1, también en la caída libre.
Se deduce que *k'* es el valor de *k* en la caída libre bajo la total atracción de la gravedad, que ya hemos convenido en representar por g. Podemos sustituir g por *k'*, y tendremos para cada plano inclinado:

$$k = g \text{ sen } x$$

La ecuación para la velocidad de un cuerpo rodando sobre un plano inclinado es, en consecuencia:

$$v = (g \text{ sen } x)\, t$$

Sobre una plano horizontal con sen x = sen 0º = 0, la ecuación para la velocidad se transforma en:

$$v = 0$$

Esto es otra manera de expresar que una bola sobre un plano horizontal, partiendo de un estado de reposo, permanecerá inmóvil a pesar del paso del tiempo. Un objeto en reposo tiende a permanecer en él, y así sucesivamente. Eso es parte de la Primera Ley del Movimiento, y se deduce de la ecuación de la velocidad en el plano inclinado.
Supongamos que la bola no parte del reposo, sino que tiene un movimiento inicial antes de empezar a rodar. Supongamos, en otras palabras, que tenemos una bola moviéndose a lo largo de un plano horizontal a 1,5 m por segundo, y que, de pronto, se halla en el extremo superior de un plano inclinado y empieza a rodar hacia abajo por él.
El experimento prueba que su velocidad después de eso es mayor de 1,5 m por segundo, en cada instante, que la que debería tener si hubiera empezado a rodar hacia abajo por el plano partiendo del reposo. En otras palabras, la ecuación para el movimiento de una bola rodando hacia abajo por un plano inclinado puede expresarse, en una forma más completa, como sigue:

$$v = (g \text{ sen } x)\, t + V$$

donde V es la velocidad inicial anterior. Si un objeto parte del reposo, entonces V es igual a 0 y la ecuación se convierte en la que teníamos antes:

$$v = (g \text{ sen } x)\, t$$

Si consideramos a continuación un objeto con una velocidad inicial sobre un plano horizontal, de forma que ese ángulo *x* es 0°, la ecuación queda:

$$v = (g \text{ sen } (0º) + V$$

o, puesto que sen 0º es 0:

$$v = V$$

Así, la velocidad de tal objeto permanece igual a su velocidad inicial, pese al tiempo transcurrido. Esto es la consecuencia de la Primera Ley del Movimiento, también deducida de la observación del movimiento sobre un plano inclinado.
La proporción en que cambia la velocidad se llama «aceleración». Si, por ejemplo, la velocidad (en metros por segundo) de una bola rodando hacia abajo por un plano inclinado es, al final de los sucesivos segundos, 4**,** 8, 12, 16.., entonces la aceleración es de un metro por segundo cada segundo.
En la caída libre, si usamos la ecuación:

$$v = gt$$

cada segundo de caída origina un aumento de velocidad de g metros por segundo. Por tanto, g representa la aceleración debida a la gravedad.
El valor de g puede determinarse a partir de los experimentos del plano inclinado. Despejando la ecuación del plano inclinado hallamos:

$$g = \frac{v}{t.senx}$$

Puesto que *v*, *t* y *x* pueden medirse, *g* puede calcularse y resulta ser igual a 9 metros por segundo, cada segundo en la superficie terrestre. Por tanto, en la calda libre bajo la acción de la gravedad normal en la superficie terrestre, la velocidad de caída está relacionada con el tiempo de este modo:

$$v = 9\ t$$

Ésta es la solución del problema original de Galileo, esto es, determinar la velocidad de caída de un cuerpo y la proporción en que esa velocidad varía.

El siguiente problema es: ¿qué distancia recorre un cuerpo que cae en un tiempo dado? A partir de la ecuación que relaciona la velocidad con el tiempo, es posible relacionar la distancia con el tiempo por un proceso de cálculo llamado «integración». No es necesario entrar en eso, sin embargo, porque la ecuación puede ser obtenida por la experiencia, y, en esencia, Galileo hizo esto.
Halló que una bola rodando hacia abajo por un plano inclinado recorre una distancia proporcional al cuadrado del tiempo. En otras palabras, doblando el tiempo, la distancia aumenta al cuádruplo, y así sucesivamente.
Para un cuerpo que cae libremente, la ecuación que relaciona la distancia *d* y el tiempo es:

$$d = ½\ g\ t^2$$

o, puesto que g es igual a 9:

$$d = 4.5\ t^2$$

A continuación, supongamos que, en vez de partir del reposo, se lanza horizontalmente un objeto desde una cierta altura en el aire. Su movimiento será, por tanto, la composición de dos movimientos: uno horizontal y otro vertical.
El movimiento horizontal, que no incluye ninguna otra fuerza aparte del impulso inicial (si despreciamos el viento, la resistencia del aire, etc.), es de velocidad constante, de acuerdo con la Primera Ley del Movimiento, y la distancia que recorre horizontalmente el objeto es proporcional al tiempo transcurrido. Sin embargo, el movimiento vertical cubre una distancia, tal como ya explicamos, que es proporcional al cuadrado del tiempo transcurrido. Antes de Galileo, se creía vagamente que un proyectil del tipo de una bala de cañón se desplazaba en línea recta hasta que el impulso que lo empujaba se agotaba de algún modo, después de lo cual caía en línea recta hacia abajo. Galileo, sin embargo, realizó el gran adelanto de *combinar* los dos movimientos.

La combinación de estos dos movimientos (proporcional al tiempo, horizontalmente, y proporcional al cuadrado del tiempo, verticalmente) origina una curva llamada parábola. Si un cuerpo se lanza, no horizontalmente, sino hacia arriba o hacia abajo, la curva del movimiento es también una parábola.
Tales curvas de movimiento, o trayectorias, se aplican, por supuesto, a proyectiles como una bala de cañón. El análisis matemático de las trayectorias contenido en los trabajos de Galileo permitió calcular dónde caería una baja de cañón, cuando se la dispara conociendo la fuerza de propulsión y el ángulo de elevación del cañón. A pesar de que el hombre ha lanzado objetos por diversión, para obtener alimentos, para atacar y para defenderse, desde hace incontables milenios, se debe únicamente a Galileo el que por vez primera, gracias a la experimentación y medición, exista una ciencia de la «balística». Por tanto, dio la casualidad que el verdadero primer hallazgo de la ciencia moderna demostraba tener una aplicación militar directa e inmediata.
También tenía una importante aplicación en la teoría. El análisis matemático de la combinación de más de un movimiento resolvía varias objeciones a la teoría de Copérnico. Demostraba que un objeto lanzado hacia arriba no quedaría retrasado en el espacio con respecto a la Tierra en movimiento, puesto que el objeto tendría dos movimientos: uno originado por el impulso del lanzamiento y otro ligado al movimiento de la Tierra. También hacía razonable suponer que la Tierra poseía dos movimientos simultáneos: uno de rotación alrededor de su eje y otro de traslación alrededor del sol —una situación que algunos de los no-copernicanos insistían que era inconcebible.
Isaac Newton extendió los conceptos de Galileo sobre el movimiento a los cielos y demostró que el mismo sistema de leyes del movimiento podía aplicarse tanto a los astros como a la Tierra. Empezó considerando la posibilidad de que la Luna pudiera caer hacia la Tierra, debido a la gravedad de ésta, pero afirmó que nunca podría colisionar con ella a causa de la componente horizontal de su movimiento. Un proyectil disparado horizontalmente, como decíamos, sigue una trayectoria parabólica descendente para interseccionar con la superficie de la Tierra. Pero la superficie de la Tierra también está curvada hacia abajo, puesto que la Tierra es una esfera. Si se le diera a un proyectil un movimiento horizontal lo suficientemente rápido, podría describir una curva hacia abajo no más acusada que la superficie de la Tierra y, por tanto, podría circunvalar eternamente la Tierra.
Ahora bien, el movimiento elíptico de la Luna alrededor de la Tierra puede descomponerse en sus componentes horizontal y vertical. El componente vertical es tal, que, en el intervalo de un segundo, la Luna cae un poco más de 0.127 cm hacia la Tierra. En ese tiempo, se desplaza también cerca de unos 1.000 m en dirección horizontal, justamente la distancia necesaria para compensar la caída y proseguir alrededor de la curvatura de la Tierra.
La cuestión era si estos 0,127 cm de descenso de la Luna era causado por la misma atracción gravitatoria que hacía que una manzana, cayendo desde un árbol, descendiera unos 5 m en el primer segundo de su caída.
Newton vio la fuerza de la gravedad terrestre como separándose en todas direcciones, al igual que una gran esfera en expansión. El área A de la superficie de una esfera es proporcional al cuadrado de su radio r:

$$A = 4 \pi r^2$$

En consecuencia, razonaba que la fuerza gravitatoria expandiéndose por la superficie esférica, debe disminuir en proporción al cuadrado de su radio. La intensidad de la luz y del sonido disminuye con el cuadrado de la distancia hasta el foco —¿por qué no podía suceder lo mismo con la fuerza de la gravedad? La distancia desde el centro de la Tierra hasta una manzana situada en su superficie es aproximadamente de 6.437 km. La distancia desde el centro de la Tierra a la Luna es aproximadamente de 386.000 km. Puesto que la distancia a la Luna es sesenta veces mayor que hasta la manzana, la fuerza de la

gravedad terrestre en la Luna debía ser 60^2, o 3.600 veces menor que en la manzana.
Si dividimos 5 cm por 3.600, nos dará aproximadamente 0.127. Le pareció evidente a Newton que la Luna ciertamente se movía dentro del campo de acción de la gravedad terrestre.
Newton fue llevado, además, a considerar la «masa» en relación con la gravedad. Corrientemente, medimos la masa como el peso. Pero el peso es solamente el resultado de la atracción de la fuerza gravitatoria de la Tierra. Si no existiera ninguna gravedad, un objeto no tendría peso; sin embargo, contendría la misma cantidad de materia. La masa, por tanto, es independiente del peso, y deberíamos ser capaces de medirla sin tener en cuenta éste.
Supongamos que se tira de un objeto situado sobre una superficie perfectamente pulimentada en una dirección horizontal a la superficie terrestre, de forma que no exista ninguna resistencia de la gravedad. Habrá que efectuar una fuerza para poner el objeto en movimiento y para acelerar este movimiento, a causa de la inercia del cuerpo. Si se mide cuidadosamente la fuerza aplicada, es decir tirando con un dinamómetro unido al objeto, hallaremos que la fuerza *f* requerida para producir una aceleración dada *a* es directamente proporcional a la masa *m.* Si se dobla la masa, hallaremos que hay que doblar la fuerza. Para una masa dada, la fuerza requerida es directamente, proporcional a la aceleración deseada. Matemáticamente, esto se expresa en la ecuación:

$$f = m\ a$$

La ecuación se conoce como la Segunda Ley del Movimiento de Newton.
Así, tal como Galileo había descubierto, la atracción de la gravedad terrestre acelera todos los cuerpos, pesados o ligeros, exactamente en la misma proporción. (La resistencia del aire puede retrasar la caída de muchos cuerpos ligeros, pero, en el vacío, una pluma caerá tan rápidamente como una masa de plomo, lo cual puede comprobarse fácilmente.) Si la Segunda Ley del Movimiento es válida, hemos de concluir que la atracción de la fuerza de la gravedad sobre un cuerpo pesado debe ser mayor que sobre un cuerpo ligero, con el fin de producir la misma aceleración. Para acelerar una masa que es ocho veces mayor que otra, por ejemplo, necesitamos una fuerza ocho veces superior. De aquí se deduce que la atracción de la fuerza de la gravedad sobre cualquier cuerpo debe ser exactamente proporcional a la masa de este cuerpo. (Éste es, en realidad, el motivo por el que la masa sobre la superficie terrestre puede medirse de una forma tan completamente precisa como el peso.) Newton desarrolló también una Tercera Ley del Movimiento: «Para cada acción, existe una reacción igual y en sentido contrario.» Esto se aplica a la fuerza. En otras palabras, si la Tierra atrae a la Luna con una fuerza determinada, la Luna, por su parte, tira de la Tierra con una fuerza igual. Si la Luna súbitamente duplicase su masa, la fuerza de la gravedad de la Tierra sobre ella quedaría también doblada, de acuerdo con la Segunda Ley; desde luego, la fuerza de la gravedad de la Luna sobre la Tierra tendría entonces que multiplicarse por dos, de acuerdo con la Tercera Ley.
De forma similar, si ambas, la Tierra y la Luna, duplicaran su masa, se produciría en este caso una doble duplicación, es decir cada cuerpo doblaría su fuerza de gravedad dos veces, con lo que tendría lugar un crecimiento de cuatro veces en total.
Newton podría solamente concluir, a partir de este tipo de razonamiento, que la fuerza gravitatoria entre dos cuerpos en el universo era directamente proporcional al producto de las masas de dichos cuerpos. Y, por supuesto, como ya había decidido antes, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (de centro a centro) entre los cuerpos. Ésta es la Ley de la Gravitación Universal de Newton.
Si *f* representa la fuerza gravitatoria, m_1 y m_2 las masas de los dos cuerpos implicados, y *d* la distancia entre ellos, entonces la ley puede establecerse:

$$f = \frac{G m_1 m_2}{d^2}$$

G es la «constante gravitatoria», cuya determinación le hizo posible «pesar la Tierra» (véase capítulo III). Newton conjeturaba que *G* tenía un valor fijo en todo el universo. Con el tiempo, se halló que nuevos planetas, no descubiertos en tiempo de Newton, ajustaban sus movimientos a las exigencias de la ley de Newton; incluso estrellas dobles increíblemente distantes danzaban al compás del análisis de Newton del universo.

Todo esto surgió de la nueva visión cuantitativa del universo explorada por Galileo. Como puede comprobarse, gran parte de las matemáticas implicadas eran realmente muy sencillas. Las que hemos citado aquí son de álgebra de estudios de bachillerato.

En realidad, todo lo que se necesitaba para introducir una de las mayores revoluciones intelectuales de todos los tiempos era:

1.º Un simple conjunto de observaciones que todo estudiante de física puede hacer con una pequeña orientación.

2.º Una sencilla serie de generalizaciones matemáticas.

3.º El genio trascendental de Galileo y Newton, que tuvieron la perspicacia y originalidad de realizar estas observaciones y generalizaciones por vez primera.

Relatividad

Las leyes del movimiento, tal como fueron elaboradas por Galileo y Newton, estaban basadas en la suposición de que existía algo como el movimiento absoluto —es decir un movimiento con referencia a algún objeto en reposo. Pero todos los objetos que conocemos del universo están en movimiento: la Tierra, el Sol, la Galaxia, los sistemas de galaxias. ¿Dónde en el Universo, entonces, podemos hallar el reposo absoluto con respecto al cual medir el movimiento absoluto?

Fue este orden de ideas lo que llevó al experimento de Michelson-Morley, el cual condujo nuevamente a una revolución científica tan grande, en algunos aspectos, como la iniciada por Galileo (véase capitulo VII). Aquí también la base matemática es bastante sencilla.

El experimento fue una tentativa para descubrir el movimiento absoluto de la Tierra con respecto a un «éter» del que se suponía estaba lleno todo el espacio que se hallaba en reposo. El razonamiento, una vez finalizado el experimento, fue el siguiente: Supongamos que un rayo de luz se envía en la dirección en que la Tierra se está desplazando por el éter, y que, a una cierta distancia en esa dirección, existe un espejo inmóvil que refleja la luz, devolviéndola a su fuente, Representemos la velocidad de la luz como *c*, la velocidad de la Tierra a través del éter como *v*, y la distancia al espejo como *d*. La luz parte con la velocidad *c* + *v:* su propia velocidad, más la velocidad de la Tierra. (Está viajando con el viento de cola, podríamos decir.) El tiempo que necesita para alcanzar el espejo es *d* dividido por *(c* + *v)*, Sin embargo, en el viaje de regreso, la situación se invierte. La luz reflejada ahora recibe el viento de cara de la velocidad de la Tierra, y su velocidad neta es *c* - *v*. El tiempo que emplea en volver al foco es *d* dividido por *(c -v)*.

El tiempo total para el viaje completo es:

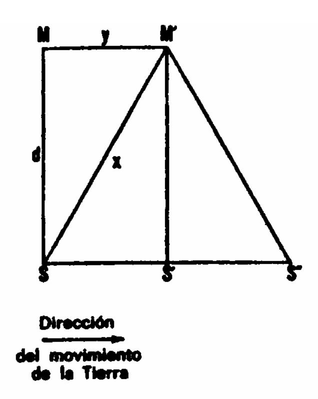
$$\frac{d}{c+v}+\frac{d}{c-v}$$

Combinando algebraicamente los términos hallamos:

$$\frac{d(c-v)+d(c+v)}{(c+v)(c-v)}=\frac{dc-dv+dc+dv}{c^2-v^2}=\frac{2dc}{c^2-v^2}$$

Supongamos ahora que el rayo de luz se envía a un espejo, situado a la misma distancia, en una dirección perpendicular al movimiento de la Tierra a través del éter.

El rayo de luz está apuntando desde *S* (el foco) a *M* (el espejo) sobre la distancia *d.* Sin embargo, durante el tiempo que toma en alcanzar el espejo,



el movimiento de la Tierra ha llevado el espejo desde *M* a *M'*, de forma que el actual camino recorrido por el rayo de luz es desde *S* a *M'*. Esta distancia llamémosla *x*, y la distancia desde *M* a *M'* llamémosla *y*.
Mientras que la luz se desplaza a través de la distancia *x* con su velocidad *c*, el espejo lo hace a través de la distancia *y* con la velocidad del movimiento de la tierra *v*. Puesto que ambos, la luz y el espejo, llegan a *M'* simultáneamente, las distancias recorridas deben ser exactamente proporcionales a las respectivas velocidades, Por tanto,

$$\frac{y}{x} = \frac{v}{c}$$

$$y = \frac{vx}{c}$$

Ahora podemos hallar el valor de *x* mediante el teorema de Pitágoras, que afirma que la suma de los cuadrados de los catetos de un triángulo rectángulo es igual al cuadrado de la hipotenusa. En el triángulo *SMM'*, por tanto, sustituyendo *vx/c* por *y*:

$$x^2 = d^2 + (\frac{vx}{c})^2$$

$$x^2 - (\frac{vx}{c})^2 = d^2$$

$$x^2 - \frac{v^2x^2}{c^2} = d^2$$

$$\frac{c^2x^2 - v^2x^2}{c^2} = d^2$$

$$(c^2 - v^2)x^2 = d^2c^2$$

$$x^2 = \frac{d^2c^2}{c^2 - v^2}$$

$$x = \frac{dc}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

La luz se refleja desde el espejo situado en *M'* al foco, que, mientras tanto, se ha desplazado a *S'*. Puesto que la distancia *S'S"* es igual a *SS'*, la distancia *M'S"* es igual a *x*. El camino total recorrido por el rayo de luz es, por tanto, *2x*, o $\frac{2dc}{\sqrt{c^2 - v^2}}$.

El tiempo empleado por el rayo de luz para recorrer esta distancia con su velocidad *c* es:

$$\frac{2dc}{\sqrt{c^2 - v^2}} - c = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

¿Cómo debemos comparar esto con el tiempo que la luz invierte en el viaje completo en la dirección del movimiento de la Tierra?

Dividamos el tiempo en el caso paralelo ($\frac{2dc}{c^2 - v^2}$) por el tiempo en el caso perpendicular $\frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}}$:

$$\frac{2dc}{c^2 - v^2} \div \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2dc}{c^2 - v^2} \times \frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{2d} = \frac{c\sqrt{c^2 - v^2}}{c^2 - v^2}$$

Ahora bien, cada número dividido por su raíz cuadrada da la misma raíz cuadrada como cociente, es, decir $x/\sqrt{x} = \sqrt{x}$. Recíprocamente, $\frac{\sqrt{x}}{x} = \frac{1}{\sqrt{x}}$. De forma que la última ecuación se simplifica en:

$$\frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

Esta expresión puede simplificarse más, si multiplicamos a la vez el numerador y el denominador por $\sqrt{1/c^2}$ (que es igual a $1/c$).

$$\frac{c\sqrt{1/c^2}}{\sqrt{c^2 - v^2}\sqrt{1/c^2}} = \frac{c/c}{\sqrt{c^2/c^2 - v^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Y éste es el punto a donde queríamos llegar. Es decir, la razón del tiempo que la luz emplearía viajando en la dirección del movimiento de la Tierra, comparada con el tiempo que necesitaría si lo hiciera en la dirección perpendicular al movimiento terrestre. Para cada valor de v mayor que cero, la expresión $\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ es mayor que l. Por tanto, si la Tierra se desplaza por un éter en reposo, la luz precisaría más tiempo viajando en la dirección del movimiento de la Tierra que en la dirección perpendicular. (En realidad, el movimiento paralelo consumiría el máximo de tiempo y el movimiento perpendicular el mínimo de tiempo.) Michelson y Morley realizaron su experimento para intentar descubrir las diferencias direccionales en el tiempo de recorrido de la luz. Lanzando su rayo de luz en todas direcciones, y midiendo el tiempo de retorno mediante su increíblemente preciso interferómetro, creyeron que debían encontrar diferencias en la velocidad aparente. La dirección en la que hallaron que la velocidad sería mínima debía ser paralela al movimiento absoluto de la Tierra, y la dirección en que la velocidad debería ser un máximo sería perpendicular al movimiento de la Tierra. A partir de la diferencia en velocidad, podría calcularse el valor (así como la dirección) del movimiento absoluto de la Tierra.

¡No hallaron diferencias en la velocidad de la luz a pesar de los cambios de dirección! Dicho de otra manera, la velocidad de la luz era siempre igual a *c*, independientemente del movimiento del foco —una clara contradicción de las leyes del movimiento de Newton—. Intentando medir el movimiento absoluto de la Tierra, Michelson y Morley habían logrado así plantear dudas, no sólo sobre la existencia del éter, sino también sobre el concepto total de reposo absoluto y de movimiento absoluto, y sobre la verdadera base del sistema newtoniano del universo (véase capítulo VII).

El físico irlandés G. F. FitzGerald concibió una forma de salvar la situación. Sugirió que todos los objetos disminuyen en longitud, en la dirección en que se mueven, en una cantidad igual a $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. Así:

$$L' = L\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

donde L' es la longitud del cuerpo que se mueve, en la dirección de su movimiento, y L es la longitud que debería tener si estuviera en reposo.

La fracción contractora $\sqrt{1 - v^2/c^2}$, según mostró FitzGerald, simplificaría precisamente la razón $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ que indica las

velocidades máxima y mínima de la luz, en el experimento de Michelson-Morley. La razón se convertiría en la unidad, y la velocidad de la luz aparecería a nuestros instrumentos y órganos sensoriales contraídos como igual en todas direcciones, independientemente del movimiento del foco de la luz por el éter. En condiciones ordinarias, el valor de la contracción es *muy* pequeña. Incluso si un cuerpo se desplaza con una décima parte de la velocidad de la luz, o 30.000 km por segundo, su longitud se contraería sólo ligeramente, de acuerdo con las ecuaciones de FitzGerald. Considerando la velocidad de la luz igual a 1, la ecuación dice:

$$L' = L\sqrt{1-(\frac{0.1}{1})^2}$$

$$L' = L\sqrt{1-0.01}$$

$$L' = L\sqrt{0.99}$$

Así, *L'* vuelve a ser aproximadamente igual a 0,995 *L*, una contracción de alrededor del 1 por ciento.
Para cuerpos móviles, velocidades semejantes a ésta tienen lugar solamente en el reino de las partículas subatómicas. La contracción de un avión que viaja a una velocidad de 3.200 km por hora es infinitesimal, como puede calcularse fácilmente.
¿A qué velocidad se contraerá un objeto hasta alcanzar la mitad de la longitud que tiene en reposo? Con *L'* igual a un medio de *L*, la ecuación de FitzGerald es:

$$\frac{L}{2} = L\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

o dividiendo por *L*:

$$\frac{1}{2} = \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$$

Elevando al cuadrado ambos miembros de la ecuación.

$$\frac{1}{4} = 1-\frac{v^2}{c^2}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{3}{4}$$

$$v = \sqrt{\frac{3c^2}{4}} = 0.866c$$

Puesto que la velocidad de la luz en el vacío es de 300.000 km por segundo, la velocidad a la cual un objeto se contrae a la mitad de su longitud es 0,866 veces 300.000, o sea, aproximadamente, 259.800 km por segundo.
Si un cuerpo se mueve con la velocidad de la luz, de forma que *v* sea igual a *c*, la ecuación de FitzGerald se transforma en

$$L' = L\sqrt{1-\frac{c^2}{c^2}} = L\sqrt{0} = 0$$

A la velocidad de la luz, por tanto, la longitud en la dirección del movimiento queda cero. Se sigue, en consecuencia, que ninguna velocidad mayor que la luz de la luz es posible, porque aparecería una longitud negativa, lo cual carece de sentido en el mundo físico.
En la década siguiente a la formulación de la ecuación de FitzGerald, fue descubierto el electrón, y los científicos empezaron a examinar las propiedades de las minúsculas partículas cargadas. Lorentz elaboró una teoría de que la masa de una partícula con una carga dada era inversamente proporcional a

su radio. En otras palabras, cuanto más pequeño era el volumen en que una partícula concentraba su carga, mayor era su masa.
Ahora bien, si una partícula está contraída a causa de su movimiento, su radio se reduce en la dirección del movimiento, de acuerdo con la ecuación de FitzGerald. Sustituyendo los símbolos *R* y *R'* por *L* y *L'* escribimos la ecuación:

$$R' = R\sqrt{1-v^2/c^2}$$

$$\frac{R'}{R} = \sqrt{1-v^2/c^2}$$

La masa de una partícula es inversamente proporcional a su radio. Por tanto,

$$\frac{R'}{R} = \frac{M}{M'}$$

donde M es la masa de la partícula en reposo y M' es su masa cuando está en movimiento.
Sustituyendo *M/M'* por *R'/R* en la precedente ecuación, tenemos:

$$\frac{M}{M'} = \sqrt{1-v^2/c^2}$$

$$M' = \frac{M}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

La ecuación de Lorentz puede manejarse como la ecuación de FitzGerald. Demuestra, por ejemplo, que para una partícula que se mueve a una velocidad de 30.000 km por segundo (la décima parte de la velocidad de la luz), la masa M' parecería ser un 0,5 % mayor que la masa en reposo M. A una velocidad de 259.800 km por segundo, la masa aparente de la partícula sería el doble que la masa en reposo.

Finalmente, para una partícula moviéndose a una velocidad igual a la de la luz, de forma que *v* es igual a *c*, la ecuación de Lorentz se transforma en:

$$M' = \frac{M}{\sqrt{1-c^2/c^2}} = \frac{M}{0}$$

Ahora bien, cuando el denominador de una fracción con un numerador fijo se vuelve cada vez más pequeño («tiende acero»), el valor de la fracción se hace progresivamente mayor; sin límites. En otras palabras, a partir de la anterior ecuación, se deduciría que la masa de un objeto que se mueve a una velocidad aproximándose a la de la luz se convertiría en infinitamente grande. Asimismo, la velocidad de la luz resultaría ser la máxima posible, pues una masa mayor que el infinito aparece como algo sin sentido.
Todo esto condujo a Einstein a refundir las leyes del movimiento y de la gravitación. Consideró un universo, en otras palabras, en el que los resultados de los experimentos de Michelson-Morley eran posibles.
Sin embargo, aún siendo así, no hemos puesto todavía el punto final. Recordemos, por favor, que la ecuación de Lorentz asume para M cierto valor superior a cero.
Esto es aplicable a casi todas las partículas con las que estamos familiarizados y a todos los cuerpos de átomos y estrellas que están integrados por tales partículas. No obstante, hay neutrinos y antineutrinos para los cuales M, la masa en reposo o «masa-reposo», es igual a cero, y esto también es cierto para los fotones. Dichas partículas se trasladan a la velocidad de la luz en el vacío, siempre y cuando se encuentren verdaderamente en un vacío. Apenas se forman, empiezan a moverse con esa velocidad sin ningún período mensurable de aceleración.
Cabría preguntarse cómo es posible hablar de «masa-reposo» de un fotón o un neutrino si éstos no reposan nunca y sólo pueden existir mientras viajan (en ausencia de materia interceptadora) a

una velocidad constante de 300.000 km/seg. Por consiguiente, los físicos O. M. Bilaniuk y E. C. G. Sudarshan han sugerido que se haga referencia a *M* como «masa propia». Para una partícula cuya masa sea mayor que cero, la masa propia es igual a la masa medida cuando la partícula está en reposo respecto a los instrumentos y al observador que toma la medida. Para una partícula con masa igual a cero, se obtiene la masa propia por medio del razonamiento indirecto. Bilaniuk y Sudarshan sugieren asimismo que todas las partículas con una masa propia cero se denominen «luxones» (palabra latina que significa «luz»), porque se trasladan a la velocidad de la luz, mientras que las partículas con masa propia superior a cero deberían llamarse «tardiones», porque se trasladan con menos velocidad que la luz, es decir a «velocidades sublumínicas».

En 1962, Bilaniuk y Sudarshan iniciaron unos trabajos especulativos sobre las consecuencias de las velocidades superiores a la de la luz («velocidades superlumínicas»).

Cualquier partícula trasladándose con esas velocidades tendría una masa imaginaria. Es decir, la masa sería un valor ordinario multiplicado por la raíz cuadrada de -1.

Supongamos, por ejemplo, una partícula que se traslada a dos veces la velocidad de la luz, de forma que en la ecuación de Lorentz *v* es igual a *2c.* En tal caso:

$$M' = \frac{M}{\sqrt{1-\frac{(2c)^2}{c^2}}} = \frac{M}{\sqrt{1-\frac{4c^2}{c^2}}} = \frac{M}{\sqrt{-3}}$$

Esto conduce al hecho de que, mientras estuviese en movimiento, su masa sería una masa propia *(M)* dividida por $\sqrt{-3}$. Pero $\sqrt{-3}$ es igual a $\sqrt{3}\times\sqrt{-1}$, es decir, $1.74\times\sqrt{-1}$. Por consiguiente, la masa propia M es igual a $M'\times 1.74\times\sqrt{-1}$. Puesto que cualquier cantidad donde se incluya $\sqrt{-1}$ se llama imaginaria, debemos llegar a la conclusión de que las partículas con velocidades superlumínicas tienen masas propias imaginarias.

Las partículas corrientes en nuestro universo ordinario tienen siempre masas que son cero o positivas. Una masa imaginaria no puede tener un significado concebible en nuestro universo.

¿Significa esto que las partículas más veloces que la luz son inexistentes? No necesariamente. Dando por supuesta la existencia de masas propias imaginarias, podemos hacer que esas partículas «más veloces que la luz» encajen en todas las ecuaciones de la Teoría Especial de la Relatividad de Einstein. Sin embargo, tales partículas muestran una propiedad aparentemente paradójica: cuanto más lento es su movimiento, tanta más energía contienen. Esto es precisamente el reverso de la situación en nuestro universo y también, quizás, el significado de la masa imaginaria.

Una partícula con una masa imaginaria gana velocidad cuando encuentra resistencia y la pierde cuando la impulsa hacia delante alguna fuerza. Al decaer su energía, se traslada cada vez más aprisa, y alcanza una velocidad infinita cuando esa energía desciende hasta cero. Al aumentar su energía, se mueve con creciente lentitud, y cuando la energía se aproxima al infinito, la velocidad se reduce hasta igualar casi la de la luz.

El físico americano Gerald Feinberg ha dado a estas partículas más veloces que la luz el nombre de «taquión» de una palabra griega que significa «velocidad».

Podemos imaginar, pues, la existencia de dos universos. Uno, el nuestro, es el universo «tardión», donde todas las partículas marchan a velocidades sublumínicas y pueden acelerar su marcha hasta alcanzar casi la velocidad de la luz cuando se incrementa su energía. El otro es el universo «taquión», donde todas las partículas alcanzan velocidades superlumínicas y pueden decelerar hasta igualar casi la velocidad de la luz cuando aumenta su energía. En medio está la «pared luxón», infinitamente delgada, donde hay partículas cuya velocidad es exactamente lumínica. Podemos considerar que ambos universos comparten la pared luxón.

Si un taquión es suficientemente energético y, por tanto, se mueve con suficiente lentitud, tendrá bastante energía y permanecerá en algún lugar durante un período lo bastante prolongado para permitirle emitir una ráfaga apreciable de fotones. (Los taquiones dejarían una estela de fotones incluso en el vacío, como una especie de radiación Cherenkov.) Los científicos se mantienen alerta para captar esas ráfagas, pero no hay grandes probabilidades de poder emplazar un instrumento en el lugar preciso donde se muestra durante una trillonésima de segundo una de esas ráfagas (posibles, pero muy infrecuentes).

Algunos físicos opinan que «todo cuanto no esté prohibido es compulsivo». Dicho de otra forma, cualquier fenómeno que no quebrante una ley de conservación *debe* manifestarse en un momento u otro; o, si los taquiones no quebrantan la relatividad especial, *deben* existir. No obstante, incluso los físicos tan convencidos de que esa fórmula es algo así como un «aseo» necesario del universo, se alegrarían (y quizá se tranquilizasen también) si encontraran algunas pruebas sobre estos taquiones no prohibidos. Hasta ahora no han logrado encontrarlas.

Una consecuencia de la ecuación de Lorentz fue deducida por Einstein para crear la que se ha convertido, tal vez, en la más famosa ecuación científica de todos los tiempos.

La ecuación de Lorentz puede escribirse en la forma siguiente:

$$M' = M(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

ya que, en notación algebraica, $1/\sqrt{x}$ puede escribirse $x^{-1/2}$. Esto dispone la ecuación de una forma en que puede desarrollarse (es decir convertirse en una serie de términos) mediante una fórmula descubierta por Newton, entre otros. La fórmula es el teorema del binomio.

El número de términos en que puede desarrollarse la ecuación de Lorentz es infinito, pero, puesto que cada término es menor que el anterior, si tomamos sólo los dos primeros términos que consideremos aproximadamente correctos, la suma de todos los restantes es bastante pequeña como para despreciarse.

El desarrollo queda así:

$$(1 - v^2/c^2)^{-1/2} = 1 + \frac{\frac{1}{2}v^2}{c^2} \ldots$$

sustituyendo esto en la ecuación de Lorentz, tenemos,

$$M' = M\left(1 + \frac{\frac{1}{2}v^2}{c^2}\right) = M + \frac{\frac{1}{2}Mv^2}{c^2}$$

Ahora bien, en física clásica la expresión $\frac{1}{2}Mv^2$ representa la energía de un cuerpo en movimiento. Si utilizamos el símbolo *e* para representar la energía, la ecuación anterior queda de la forma siguiente:

$$M' = M + e/c^2$$

o

$$M' - M = e/c^2$$

El incremento en la masa debido al movimiento *(M' - M)* puede representarse como m, así pues:

$$m = e/c^2$$

o

$$e = mc^2$$

Fue esta ecuación la que por primera vez indicaba que la masa era una forma de energía. Einstein llegó a demostrar que la ecuación podía aplicarse a todas las masas, no solamente al incremento en la masa debido al movimiento.

También aquí, la mayor parte de las matemáticas implicadas están solamente a nivel universitario. Sin embargo, representó para el mundo los comienzos de una visión del Universo más grande y amplia aún que la de Newton, y también puso de manifiesto la manera de concretar sus consecuencias. Señaló el camino para el reactor nuclear y la bomba atómica, por ejemplo.

BIBLIOGRAFÍA

Una introducción a la Ciencia resultaría incompleta sin una guía para ampliar las lecturas acerca del tema. Seguidamente presento una breve selección de libros. Esta relación constituye una miscelánea y no pretende ser una colección completa de los mejores libros modernos sobre temas científicos. Sin embargo, he leído la mayor parte de ellos y puedo recomendarlos todos, incluso los míos.

CAPÍTULO X. — LA MOLÉCULA

FIESER, L. F., y M., *Organic Chemistry*. D. C. Heath & Company, Boston, 1956.

GIBBS, F. W., *Organic Chemistry Today*. Penguin Books, Baltimore, 1961.

HUTTON; KENNETH, *Chemistry*. Penguin Books, Nueva York, 1957.

PAULING, LINUS, *The Nature of the Chemical Bond (3.ra Ed.)*. Cornell University Press, Ithaca, Nueva York. 1960.

PALING, LINUS, y HAYWARD, R., *The Architecture of Molecules*. W. H. Freeman & Co. San Francisco, 1964.

CAPÍTULO XI. -LAS PROTEÍNAS

ASIMOV, ISAAC, *Photosynthesis*. Basic Books. Nueva York, 1969.

BALDWIN, ERNEST, *Dyrzamis Aspects of Biochemistry*. (5ta. Ed.) Cambridge University Press, Nueva York, 1967.

BALDWIN, ERNEST, *The Nature of Biochemistry*. Cambridge University Press. Nueva York, 1962.

HARPER, HAROLD A., *Review of Physiological Chemistry* (8.va. Ed.). Lange Medical Publications, Los Altos, Calif., 1961.

KAMEN, ARTIN D., *Isotopic Tracers in Biology*. Academic Press, Nueva York, 1957.

KARLSON, P., *Introduction to Modern Biochemistry*. Academic Press, Nueva York, 1963.

LEHNINGER, A. L., *Bioenergetics*. Benjamin Company, Nueva York, 1965.

SCIENTIFIC AMERICAN (editores), *The Physics and Chemistry of Life*. Simon & Schuster, Nueva York, 1955.

CAPÍTULO XII. — LA CÉLULA

ANFINSEN, CHRISTIAN B., *The Molecular Basis of Evolution*. John Wiley & Sons, Nueva York, 1959.

ASIMOV, ISAAC, *The Genetic Code*. Orion Press, Nueva York, 1962.

ASIMOV, ISAAC, *A Short History of Biology*. Doubleday & Company, Nueva York, 1964.

BOYD, WILLIAM C., *Genetics and the Races of Man*. Little, Brown & Company, Boston, 1950.

BUTLER, J. A. V., *Inside the Living Cell*. Basic Books, Nueva York, 1959.

DOLE, STEPHEN H., *Habitable Planets for Man*. Blaisdelt Publishing Company, Nueva York, 1964.

HARTMAN, P. E., y SUSKIND, S. R., *Gene Action*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1965.

HUGHES, ARTHUR, *A History of Cylology*. Abelard-Schuman, Nueva York, 1959.

NELL, J. V., y SCHULL, W. J., *Human Heredity*. Uiversity of Chicago Press, Chicago, 1954.
OPARIN, A. I., *The Origin of Life on the Earth*. Academic Press. Nueva York, 1957.
SINGER, CHARLES, *A Short Hislory of Anatomy and Physiology from the Greeks to Harvey*. Dover Publications, Nueva York, 1957.
SULLIVAN, WALTER, *We Are Not Alone*. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1964.
TAYLOR, GORDON R., *The Science of Life.* McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1963.
WALKER, KENNETH, *Human Physiology*. Penguin Books, Nueva York, 1956.

CAPÍTULO XIII. — LOS MICROORGANISMOS

BURNET, F. M., *Viruses and Man* (2da. Ed.). Penguin Books, Baltimore, 1955.
DE KRUIF, PAIL, *Microbe Hunters*. Harcourt,. Brace & Company, Nueva York, 1932.
DUBOS, RENÉ, *Louis Pasteur*. Little, Brown & Company, Boston, 1950.
LUDOVICI, L. J., *The World of the Microscope*. G. P. Puntnam's Sons, Nueva York, 1959.
McGRADY, PAT, *The Savage Cell*. Basic Books, Nueva York, 1964.
RIEDMAN, SARAH R., *Shots without Guns*. Rand, McNally & Company, Chicago, 1960.
SMITH, KENNETH M., *Beyond the Microscope*. Penguin Books. Baltimore, 1957.
WILLIAMS, GREER, *Virus Hunters*. Alfred A. Knopf, Nueva York, 1959.
ZINSSER, HANS, *Rats, Lice and History*. Little, Brown & Company. Boston, 1935.

CAPÍTULO XIV. — EL CUERPO

ASIMOV, ISAAC, *The Human Body*. Houghton Mifflin Company, Boston, 1963.
CARLSON, ANTON J., y JOHNSON, VICTOR, *The Machinery of the Body*. University of Chicago Press, Chicago, 1953.
CHANEY, MARGARET S., *Nutrition*. Houghton Mifflin Company, Boston, 1954.
McCOLLUM, ELMER VERNER, *A History of Nutrition*. Houghton Mifflin Company, Baston, 1957.
WILLIAMS, ROGER J., *Nutrition in a Nutshell*. Doubleday & Company, Nueva York, 1962.

CAPÍTULO XV. — LAS ESPECIES

ASIMOV, ISAAC, *Wellsprings of Life*. Abelard-Schuman, Nueva York, 1960.
BOULE, M., y VALLOIS,. H. V., *Fossil Men*. Dryden Press, Nueva York, 1957.
CARRINGTON, RICHARD, *A Biography of the Sea*. Basic Books, Nueva York, 1960.
DARWIN, FRANCIS (editor), *The Life and Letters of Charles Darwin* (2 vols.). Basic Books, Nueva York, 1959.
DE BELL, G., *The Environmental Handbook*. Ballantine Books, Nueva York, 1970.
HANRAHAN, JAMES S., y BUSHNELL, DAVID, *Space Biology*. Basic Books, Nueva York, 1960.
HARRISON, R. J., *Man, the Peculiar Animal*. Penguin Books, Nueva York, 1958.
HOWELLS, WILLIAM, *Mankind in the Making*. Doubleday & Company, Nueva York, 1959.
HUXLEY, T. H., *Man's Place in Nature*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1959.
MEDAWAR, P. B., *The Future of Man*. Basic Books, Nueva York, 1960.
MILNE, L. J., y M. J., *The Biotic World and Man*. Prentice-Hall, Nueva York, 1958.

MONTAGU, ASHLEY, *The Science of Man*. Odyssey Press, Nueva York, 1964.
MOORE, RUTH, *Man, Time, and Fossils* (2da. Ed.). Alfred A. Knopf, Nueva York, 1963.
ROMER, A. S., *Man and the Vertebrates* (2 vols.), Penguin Books, Nueva York, 1954.
ROSTAND, JEAN, *Can Man Be Modified?* Basic Books, Nueva York, 1959.
SAX, KARL, *Standing Room Only*. Beacon Press, Boston, 1955.
SIMPSON, GEORCE G., PITTENDRIGH, C. S., y TIFFANY, L. H., *Life: An Introduction to College Biology* (2da. Ed.). Harcourt, Brace & Company, Nueva York, 1965.
TINBERGEN, NIKO, *Curious Naturalists*. Basic Books, Nueva York, 1960.
UBBELOHDE, A. R., *Man and Energy*. Penguin Books, Baltimore, 1963.

CAPÍTULO XVI. — LA MENTE

ANSBACHER, H., y R. (directores), *The Individual Psychology of Alfred Adler*. Basic Books, Nueva York, 1956.
ARIETI, SILVANO (director), *American Handbook of Psichiatry* (2 vols.). Basic Books, Nueva York, 1959.
ASIMOV, ISAAC, *The Human Brain*. Houghton Mifflin Company, Boston, 1964.
BERKELEY, EDMUND C., *Symbolic Logic and Intelligent Machines*. Reinhold Publishing Corporation, Nueva York, 1959.
FREUD, SIGMUND, *Collected Papers* (5 vols.). Basic Books, Nueva York, 1959.
JONES, ERNEST, *The Life and Work of Sigmund Freud* (3 vols.). Basic Books, Nueva York, 1957.
LASSEK, A. M., *The Human Brain*. Charles C. Thomas, Springfield, Ill, 1957.
MENNINGER, KARL, *Theory of Psychoanalytic Technique*. Basic Books, Nueva York, 1958.
MURPHY, GARDNER, *Human Potentialities*. Basic Books, Nueva York, 1958.
RAWCLIFFE, D. H., *Illusions and Delusions of the Supernatural and Occult*. Dover Publications, Nueva York, 1959.
SCIENTIFIC AMERICAN (editores), *Automatic Control*. Simon & Schuster, Nueva York, 1955.
SCOTT, JOHN PAUL, *Animal Behavior*. University of Chicago Press, Chicago, 1957.
THOMPSON, CLARA y MULLAHY, PATRICK, *Psychoanalysis: Evolution and Development*. Grove Press. Nueva York, 1950.

APÉNDICE. — LAS MATEMÁTICAS EN LA CIENCIA

COURANT, RICHARD y ROBBINS, HERBERT, *What Is Mathematics?* Oxford University Press, Nueva York, 1941.
DANTZIG, TOBIAS, *Number, the Language of Science*. Macmillan Company, Nueva York, 1954.
FELIX, LUCIENNE, *The Modern Aspect of Mathematics*. Basic Books. Nueva York, 1960.
FREUND. JOHN E., *A Modern Introduction to Mathematics*. Prentice Hall, Nueva York, 1956.
KLINE, MORRIS, *Mathematics and the Physical World*. Tbomas Y. Crowell Company, Nueva York, 1959.
KLINE, MORRIS, *Mathematics In Western Culture*. Oxford University Press, Nueva York. 1953.
NEWMAN, JAMES, R., *The World of Mathematics* (4 vols.). Simon & Schuster, Nueva York, 1956.
STEIN, SHERMAN K., *Mathematics, the Man-Made Universe*. W. H. Freeman & Company, San Francisco, 1963.
VALENS, EVANS G., *The Number of Things*. Dutton & Co. Nueva York, 1964.

GENERALIDADES

ASIMOV, ISAAC, *Asimov's Biographical Encyclopedia of Science and Technology*. Doubleday & Company Nueva York, 1964.
ASIMOV, ISAAC,. *Life and Energy*. Doubleday & Company, Nueva York, 1962.
ASIMOV, ISAAC, *The Words of Science*. Houghton Mifflin Company, Boston, 1959.
CABLE, E. J, y col. *The Physical Sciences*. Prentice-Hall, Nueva York, 1959.
GAMOV, GEORGE, *Matter, Earth, and Sky*. Prentice-Hall, Nueva York, 1958.
HUTCHINGS, EDWARD, JR. (director), *Frontiers in Sciente*, Basic Books, Nueva York, 1958.
SHAPLEY, HARLOW, RAPPORT, SAMUEL, y WRIGHT, HELEN (directores), *A Treasury of Science* (4ta. Ed.). Harper & Brothers, Nueva York, 1958.
SLABAUGH, W. H, y BUTLER, A. B., *College Physical Science*. Prentice-Hall, Nueva York, 1958.
WATSON, JANE WERNER, *The World of Science*. Simon & Schuster, Nueva York, 1958.

FIN

Índice